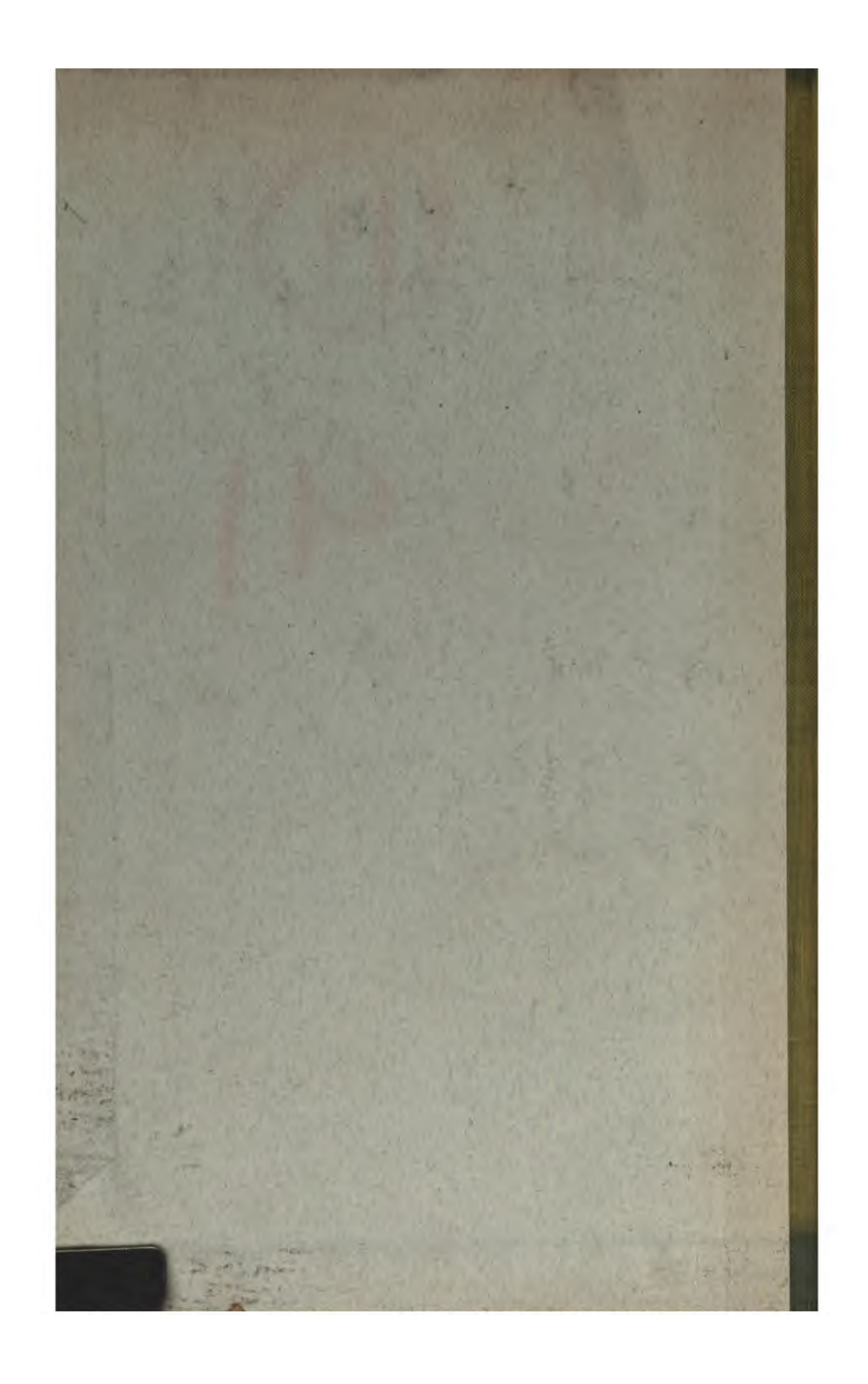
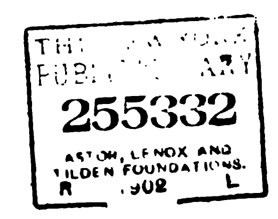




Handbuch

der

Elektrotechnik

bearbeitet von

Professor Dr. **H. Ebert,** München. — Ingenieur **H. Eisler,** Wien. — Betriebs-ingenieur Dr. **B. Gleichmann,** München. — Professor Dr. **C. Heinke,** München. — Direktor **R. O. Heinrich,** Berlin. — Postinspektor **O. Jentsch,** Berlin. — Dipl.-Ingenieur **J. Jonas,** Frankfurt a. M. — Oberingenieur **F. Jordan,** Bremen. — Professor Dr. **J. Kollert,** Chemnitz. — Chefelektriker Dr. **F. Niethammer,** Berlin. — Vorsteher des Telegraphen-Betriebsbureaus des Reichs-Postamts **J. Noebels,** Berlin. — Oberingenieur **Karl Pichelmayer,** Wien. — Oberingenieur **Pohl,** Berlin. — Professor Dr. **M. Reithoffer,** Wien. — Ingenieur **F. Ross,** Wien. — Postrat **A. Schluckebier,** Berlin. — Ingenieur **E. Schulz,** München. — Direktor Dr. **E. Sieg,** Kalk bei Cöln. — Professor Dr. **J. Teichmüller,** Karlsruhe, u. a.

herausgegeben von

Dr. C. Heinke

Professor der Elektrotechnik an der technischen Hochschule in München.

Erster Band:

Die Elektrophysik

und die

Theorie des Elektromagnetismus

von

C. Heinke und **H. Ebert.**

Erste Abteilung.

Leipzig

Verlag von S. Hirzel

1902.

Die Elektrophysik

und die

Theorie des Elektromagnetismus

von

Dr. C. Heinke und **Dr. H. Ebert.**

5.

Erste Abteilung:

Die Entwickelung der Elektrophysik.
Die Hülfsvorstellungen der Elektrophysik. — Elektrische Spannungs-erregung und dielektrische Erscheinungen.

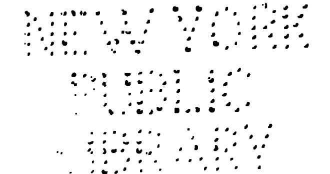
Bearbeitet

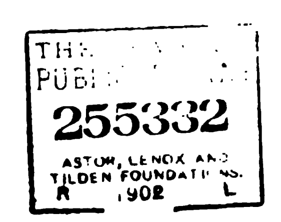
von

Dr. C. Heinke.

Mit 77 Abbildungen.

Leipzig
Verlag von S. Hirzel
1902.





Druck von Fischer & Wittig in Leipzig.

Vorwort.

Dem Verfasser war es bei dem ersten Bande mehr um eine Durchdringung des einschlägigen physikalischen Stoffes von einem modernen, der Technik angepassten Standpunkte aus zu thun, als um eine blosse Aneinanderreihung möglichst vieler verschiedener Versuchsdaten, Auffassungen und Darstellungen aus physikalischen Werken. Vielleicht wird aus diesem Grunde das eine oder andere in solchen Werken regelmässig Vertretene hier vermisst werden, weil es für den vorliegenden Zweck entweder als veraltet, oder als weniger wichtig angesehen wurde. Dafür werden sich aber auch mancherlei neue Darstellungen und Auffassungen finden, deren Anführung hier im einzelnen nicht angezeigt ist, aber auch unnötig erscheint, da sie sich für den Kundigen unschwer erkennen lassen; namentlich wurde darauf Gewicht gelegt einen besseren Zusammenschluss zwischen den einzelnen Erscheinungsgebieten anzustreben, um eine einheitlichere und gedankenökonomisch vorteilhaftere Auffassung zu ermöglichen, welchem Zweck auch die Umordnung des Stoffes, sowie die gelegentlich eingeflochtene Begründung für die Disposition in den einzelnen Abschnitten dienen soll.

Es schien ferner dem Verfasser am Platze gerade im ersten Bande, welcher die elektrophysikalischen Begriffe und Grundlagen behandelt, an einigen geeignet erscheinenden Stellen auch die philosophische Seite — eine andere kurze Bezeichnung ist trotz des für viele unangenehmen Beigeschmacks dieses Wortes nicht auffindbar, höchstens könnte man hierfür das im richtigen Sinn aufgefasste „religiös“ einsetzen — nicht zu kurz kommen zu lassen. Bei dem Divergenzbestreben aller Spezialgebiete und bei ihrer Neigung sich von anderen Wissensgebieten immer mehr loszutrennen, scheint es im Interesse des Wissens-Ganzen durchaus nötig, dass bei einzelnen Gelegenheiten „zum Sammeln geblasen wird“, um nach den verschiedenen Seiten wieder einmal Fühlung zu bekommen. Ein solcher Versuch ist auch hier an einigen Stellen, namentlich der Einleitung zum zweiten Abschnitt über die Hülfsvorstellungen, gemacht worden. Wenn hierbei auch manches berührt wurde, was auf den ersten Blick direkt wenig mit der Elektrotechnik zu thun hat, so hofft der Verfasser dennoch, dass mit Rücksicht auf das vor-

genannte Ziel des Anschlusses an das Wissens-Ganze dieser Versuch im Leserkreise hinreichendes Interesse finden wird, um innerliche Rechtfertigung zu erfahren. Gerade für die letzten Grundlagen spielt die Erkenntnistheorie eine so bedeutende Rolle, dass auch ein technischer Wissenschaftszweig bei moderner Behandlung mit ihr in Berührung kommt.

Mit Rücksicht auf einen mässigen Umfang musste hingegen vielfach auf weitergehende Betrachtungen der theoretischen Physik verzichtet werden. Soweit diese nicht hier oder in der spezieller hierfür gedachten Abteilung (H. I, 3) Berücksichtigung finden konnten, sei für weiteres Studium auf folgende Handbücher der Elektrophysik verwiesen:

1) Wiedemann, Bd. I bis IV (Verlag von F. Vieweg & Sohn in Braunschweig) abgekürzt in Wied. (vgl. Seite XIV).
2) Winkelmann, Bd. III a und III b (Verlag von J. A. Barth in Leipzig) abgekürzt in Wk. (vgl. Seite XIV).
3) Mascart & Joubert, Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus Bd. I u. II (deutsch bei J. Springer in Berlin).
4) Maxwell, Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus Bd. I und II (deutsch bei J. Springer in Berlin).

Hinsichtlich der Citate des folgenden Bandes I sei bemerkt, dass bei allen elektrotechnisch wichtig erscheinenden Punkten nach Möglichkeit auf die Quellen selbst hingewiesen wurde, bei den übrigen hingegen vielfach auf die meist leichter zugänglichen Handbücher oder auch Referate in der ETZ u. s. f., welche etwaigen Interessenten mit weitergehenden Bedürfnissen die Quellen ausführlich namhaft machen. Dies erfolgte zur Vermeidung eines zu grossen Ballastes an citierten physikalischen Arbeiten, welche vielfach für den vorliegenden Zweck geringere Wichtigkeit besitzen.

Die Anführung experimentellen Zahlenmaterials wurde nach Möglichkeit auf charakteristische und für den vorliegenden Fall wichtigere Punkte beschränkt, im Übrigen auf die Einzellitteratur oder physikalische Sammelwerke wie Pogg. Ann. bezw. Wied. Ann. u. s. f. verwiesen.

Dass die Bearbeitung dieses Bandes den Handbüchern der Physik keine eigentliche Konkurrenz zu liefern unternimmt, sondern für alle spezielleren Zwecke jene als Ergänzungen betrachtet, geht bereits aus den wiederholten Verweisungen auf die in jenen enthaltenen ausgedehnten theoretischen Ableitungen und Betrachtungen hervor, sowie überhaupt aus dem Umstande, dass der Schwerpunkt der Behandlung nach der schon angedeuteten begrifflichen Richtung verlegt wurde. Bezüglich des letzteren Punktes sei noch bemerkt, was ebensowohl für die zunächst erscheinende erste Abteilung als die noch in Arbeit befindliche zweite gilt, dass sich der Band I des Handbuches vollständiger, gelehrter und gedrängter, vermutlich auch mit geringerem Aufwand an Zeit und Mühe von Seite des Verfassers hätte schreiben lassen, dass aber der Nutzen für die Mehrzahl der Leser alsdann, nach Überzeugung des Verfassers, ein geringerer gewesen und das für Band I von ihm angestrebte Ziel noch weniger erreicht worden wäre. Band I soll eben kein Handbuch der Physik sein, sondern als Einführung in das Handbuch der Elektrotechnik dienen und als Schwerpunkt deshalb die Be-

handlung und Klarstellung der einschlägigen grundlegenden Erfahrungsthatsachen und physikalischen Begriffe umfassen.

Durch äussere Umstände wurde die Arbeit des Verfassers auf die Dauer eines Jahres fast völlig unterbrochen und das Erscheinen dementsprechend verzögert, doch wurden auch bei den vorher niedergeschriebenen drei Abschnitten dieser zunächst erscheinenden Abteilung durch Überarbeitung bez. Nachträge die wichtigeren Fortschritte der letzten Jahre noch berücksichtigt. Die äusserliche Zweiteilung von Band I in zwei gebundene Hälften schien mit Rücksicht auf eine grössere Handlichkeit erwünscht und auf Grund der vorgenommenen Stoffeinteilung (vgl. Einleitung) auch weniger bedenklich oder störend.

Die in H. I, 1 häufiger benutzten Abkürzungen und Symbole finden sich hinter der Inhaltsübersicht zusammengestellt.

Nicht überflüssig dürfte vielleicht noch die Bemerkung sein, dass im Folgenden die Bezeichnungen elektromagnetisch und Elektromagnetismus nicht in dem engen Sinn der Elektromagnete, sondern stets in dem weiteren Sinne gebraucht werden, also das Gebiet der elektrischen und magnetischen Erscheinungen umfassend und gleichsam ihre untrennbare Verknüpfung ausdrückend, wie sie endgiltig durch die Versuche von HERTZ dargethan wurde.

Zum Schluss habe ich noch den Herren Ingenieuren RAILING und DENZLER für ihre Beihülfe bei der Korrekturlesung, sowie Herrn Ingenieur HORSCHITZ für seine Beihülfe bei der Umzeichnung der Figurenskizzen zu danken und zu bemerken, dass für die weiter ausgeführten Figuren mehrfach Klischees aus bereits erschienenen Werken benutzt wurden, wie Fig. 1 bis 3 aus OSTWALD, Geschichte der Elektrochemie, ferner 27 bis 30, 39, 72, 74, 75 aus WIEDEMANN (Elektrizität), sowie endlich eine Reihe weiterer aus EBERT (Magnetische Kraftfelder).

München, im Juni 1902.

Der Verfasser.

Inhaltsverzeichnis.

Die Entwickelung der neueren Elektrophysik.

1850—1900.

Zweiter Abschnitt.

Die Hülfsvorstellungen der Elektrophysik.

A. Allgemeines über die wissenschaftliche Bedeutung der Hülfsvorstellungen.

B. Ältere Hülfsvorstellungen.

C. Die neueren Hülfsvorstellungen.

Die elektromagnetischen Erscheinungen.

Dritter Abschnitt.

Die Erzeugung des elektrischen Spannungszustandes und die dielektrischen Erscheinungen.

A. Die Ursachen der Spannungserregung.

1. Die Reibungselektrizität.

2. Spannungserregung durch chemische Vorgänge (Berührungselektrizität).

3. Spannungserregung durch Temperaturunterschiede (Thermoelektrizität).

4. Spannungserregung durch Aenderung des magnetischen Feldes (Induktionselektrizität).

B. Die Erscheinungen im elektrischen Felde.

1. Das elektrische Feld.

2. Eigenschaften der Dielektrika.

a) Bestimmung und Werte von Dielektrizitätskonstanten.

b) Rückstand und Energieverluste im Dielektrikum.

c) Dielektrische Festigkeit und Dichtigkeit.

3. *Wechselwirkung zwischen elektrischer Spannungsenergie und mechanischer Energie.*

a) Elektrostriktion und Doppelbrechung im elektrischen Felde.

b) Durch das elektrische Feld veranlasste Bewegungserscheinungen (ponderomotorische Wirkungen).

c) Die Umwandlung mechanischer (Bewegungs-) Energie in dielektrische Spannungsenergie.

Zusammenstellung der mehrfach in H. I, 1 gebrauchten Symbole und ihrer Bedeutung.

Q = Elektrizitätsmenge (elektrische Ladung).

E = elektrische Spannung (allgemein).

e = „ „ (Momentanwert).

$\bar{E}$ = elektrische Gleichspannung.

$\tilde{E}$ = „ Wechselspannung (effektiver Mittelwert 100).

$\tilde{E}_N$ = elektrische Wechselspannung (Kraftlinien-Mittelwert 99).

$\tilde{\bar{E}}$ = mittleres Gleichspannungs-Niveau einer periodisch veränderlichen Spannung (Wellenspannung).

C = Kapazität (einer Leiteranordnung).

F = mechanische Kraft.

F_e = elektrische Kraft.

m = Menge (bei ponderomotorischen Wirkungen, z. B. von gravitierender Masse oder von Elektrizität).

l = Entfernung bezw. Weglänge (z. B. der elektrischen Verschiebungsbahn).

J = elektrische Stromstärke (allgemein).

i = elektrische Stromstärke (Momentanwert).

$\mathcal{J}$ = elektrische Gleichstromstärke.

$\mathcal{J}$ = „ Wechselstromstärke (effektiver Mittelwert 100).

$\mathcal{J}_Q$ = elektrische Wechselstromstärke (Elektrizitätsmenge-Mittelwert 100).

R = Ohmscher Widerstand (Gleichstromwiderstand, elektrischer Reibungswiderstand 68).

q = Querschnitt, z. B. Verschiebungsquerschnitt.

S_d = dielektrischer Spannwiderstand (65).

$\varkappa$ = Dielektrizitätskonstante.

$\varrho = \frac{1}{k}$ = spezifischer Leitungswiderstand.

$k = \frac{1}{\varrho}$ = spezifisches Leitvermögen.

k = Masssystemfaktor in 104 bis 108.

N = magnetisches Kraftlinienfeld (Anzahl Kraftlinien).

N_{el} = elektrisches Kraftlinienfeld.

L = Selbstinduktionskoeffizient.

M = Wechselinduktionskoeffizient.

ε = elektrische Ladung pro Masseneinheit, z. B. pro Grammäquivalent.

A = Arbeit, Energiemenge.

T = absolute Temperatur.

t = Temperatur im Abschnitt über Thermoelektrizität (93).

t = Zeit bei zeitlich veränderlichen Grössen (99 u. ff.).

σ = Scheitelfaktor (100).

f = Formfaktor in Verbindung mit periodischen Wechselgrössen (100).

B = magnetische Kraftlinien auf cm^2.

B_{el} = elektrische Kraftliniendichte.

w = Windungszahl (104).

μ = magnetische Permeabilität bezw. Index für Magnetisierungskomponente.

W = elektrische Leistung.

S, s = Streufeld bezw. Index dafür (104).

z = Wechselzahl in der Sekunde bei periodischem Wechselstrom.

$\sim$ = Periodenzahl bei periodischem Wechselstrom (Frequenz).

$\omega = \frac{de}{dt}$ bezw. $\frac{di}{dt}$ auf die Sekunde bezogen (108).

λ = lineare Verschiebung des Dielektrikums (118).

Die beigefügten Zahlen verweisen für die nähere Erläuterung auf die Artikelnummer.

Abkürzungen:

ESE = elektrostatische Einheiten
EMM = elektromagnetisches Masssystem.

Abkürzungen bei Citaten:

ETZ = Elektrotechnische Zeitschrift (Berlin bei J. Springer) mit Jahreszahl und Seitenzahl.
Ph. Z. = Physikalische Zeitschrift (Leipzig bei S. Hirzel) mit Jahrgangszahl und Seitenzahl.
H. I, 3 = Handbuch der Elektrotechnik (Leipzig bei S. Hirzel) mit Bandzahl und Abteilung.
Die Verweise innerhalb H. I, 1 in fetten Ziffern geben die Artikelnummer an.
HOPPE = Geschichte der Elektrizität (Leipzig bei A. Barth) mit Paragraphenzahl.
ROSENBERGER = Elektrische Prinzipien (Leipzig bei A. Barth) mit Seitenzahl.
OSTWALD = Geschichte der Elektrochemie (Leipzig bei Veit & Co.); die kleinen Ziffern beziehen sich auf die Seite.
EBERT, 302 = Magnetische Kraftfelder (Leipzig bei A. Barth), Artikel 302.
Wd. IV, 92 = WIEDEMANN, Elektrizität, Band IV, Artikel 92 (nicht Seite), vgl. Vorwort.
Wk. IIIa, 117 = WINKELMANN, Handbuch der Physik, Band III, erste Abteilung, Seite 117, vgl. Vorwort.
WIED. Ann. 41, 801 = WIEDEMANNs Annalen, Band 41, Seite 801.
P. A. 34, 418 = POGGENDORFs Annalen, Band 34, Seite 418.
Exp. Res. = FARADAY, Experimental Researches; III, 115 bedeutet Bd. III, Seite 115.
Tr. I, 315 = MAXWELL, Treatise, Band I, Artikel 315.

Druckfehlerberichtigungen:

Seite 1 Zeile 3 von oben lies: aller anstatt: einer.
„ 3 „ 6 „ unten Einzelfall statt Einzellfall.
„ 81 „ 5 „ oben ist hinter GRAMME die Zeile ausgefallen:
— unabhängig von der bereits 1860 durch PACINOTTI erfolgten aber ohne weitere Beachtung gebliebenen Lösung —.
„ 111 Zeile 7 von oben lies: Heberschreiber anstatt HEBERSCHREIBER.
„ 111 „ 13 „ unten lies: Federwage anstatt Felderwage.
„ 112 „ 20 „ oben lies: FRÖLICH anstatt FRÖHLICH.
„ 114 „ 20 „ oben lies: DORN anstatt DOHRN.
„ 115 „ 25 „ oben lies: Tr. I, 355 anstatt Tr. I, 355.
„ 115 „ 32 „ oben lies: MAXWELL I, 352 anstatt MAXWELL I, 352.
„ 132 „ 7 „ oben ist hinter gemeinschaftlichen einzufügen: (richtiger parallelen).
„ 145 am inneren Seitenkopf lies 57 anstatt 58.
„ 151 Absatz 2 Zeile 4 von oben lies: sonstwie statt sonst wie.
„ 156 zweitletzter Absatz Zeile 4 von oben lies: dieser statt diese.
„ 174 Zeile 14 von oben lies: die Zahl $4\pi Q$ anstatt: die Zahl von $4\pi Q$.
„ 196 „ 13 „ oben hat doch fortzufallen.
„ 206 „ 12 „ unten lies: Reibung auch anstatt Reibung gleichfalls.
„ 241 „ 11 „ unten lies: $10^6\,\Omega$ anstatt $10\,\Omega$.
„ 273 sind in der Tabelle der Formfaktoren die Werte der Scheitelfaktoren σ hinzuzufügen:

Formfaktor f. . . . =	1·00	1·04	1·04	1·04	1·11	1·15	1·31	1·44
$\sigma = \frac{1}{f} \cdot \frac{e'}{E_N} = \frac{e'}{\bar{E}} =$	1·00	1·22	1·22	1·22	1·41	1·74	2·22	3.23

Einleitung.

Wie jedes Werdende, so ist auch die Wissenschaft eines Teilgebietes, z. B. der Elektrophysik, einer gewissen Gesetzmässigkeit in der Entwickelung unterworfen. Das Gemeinschaftliche in der Entwickelung einer induktiven Wissenschaft besteht kurz in Folgendem: Die einzelnen dem freiwilligen oder unfreiwilligen Experimentator zur Kenntnis gelangenden Erscheinungen werden zunächst hinsichtlich ihrer Gleichartigkeit in Gruppen zusammengefasst. Aus diesen gesichteten Erscheinungsgruppen oder experimentellen Thatsachen wird durch geistig hochstehende Forscher ein bestimmter gemeinschaftlicher Grundzug herausgelesen und formuliert. Diese Formulierungen, soweit sie auf Grund der vielfältigsten Versuchsvariationen und Beobachtungen als gelungen betrachtet werden können, liefern die Grundgesetze des ganzen Gebietes. Hierbei ist nur zu erwähnen, dass, wie später noch zu zeigen ist, die geschichtliche Reihenfolge vielfach vom sogenannten Zufall, d. h. nicht näher angebbaren Momenten sowohl im Auftreten der äusseren Erscheinungen als auch der Gedanken- und Ideenverbindungen des Forschers abhängen, da meist irgendwelche Analogieschlüsse mit ins Spiel treten und nicht selten Naturgesetze, die sich später in ihrer Formulierung — wenigstens innerhalb bestimmter Grenzen — als richtig erweisen, aus nicht stichhaltigen Vorstellungen abgeleitet worden sind.

Bereits in diesem geistigen Prozess der Zusammenfassung oder Unterordnung grösserer Erscheinungsgruppen, welche dem ersten Anblick nach häufig kaum eine Ähnlichkeit darbieten, unter ein gemeinschaftliches Naturgesetz spricht sich der Grundcharakter jeder Wissenschaft als „gedankenökonomisches“ Hülfsmittel[1]) des Menschen aus. Als abstrahiertes Gesetz wird eine derartige Formulierung nur eine ganz bestimmte Seite aller dieser Erscheinungen herausgekehrt darstellen, aber ein vollständigeres Bild der komplexen und dem unbefangenen Beobachter entgegentretenden Einzelerscheinungen weder zu geben brauchen noch geben.

Dieses Bestreben das ganze Erscheinungsgebiet mit dem geringsten Aufwand von Gedanken, bezw. Gedächtnis geistig zu beherrschen, tritt denn auch bei der Weiterentwickelung jeder Einzelwissenschaft immer wieder klar zu Tage und offenbart sich einmal in der stammbaumartigen Einordnung

1) Diese Auffassung des Charakters jeder Wissenschaft ist zuerst von E. Mach nachdrücklich hervorgehoben worden und in seinen Werken (namentlich „Prinzipien der Mechanik“) ausführlicher begründet.

der Untergruppen und aller weiter drängenden Differenzierungen und Spezialisierungen, namentlich aber in dem Streben nach Auffindung des gemeinschaftlichen Ausstrahlungspunktes. Als das erstrebte schliessliche Hauptziel erscheint hierbei dem Geiste eine möglichst lückenlose Ableitung oder Deduktion aller Erscheinungen aus einem Minimum von Voraussetzungen oder, richtiger, Grundthatsachen. Dass diese Ableitung oder Deduktion zeitlich nicht bis zu der ja absolut nie erfolgenden Erreichung des Zieles verschoben wird, ist kaum nötig zu erwähnen; vielmehr ist es eine naturnotwendige Folge der Relativität all unseres Wissens, dass überall, d. h. an jeder einen relativen Endpunkt bildenden Verzweigung jenes Baumes, eine teilweise, selbst wieder relative Deduktion einsetzen kann, so dass Induktion und Deduktion gleichzeitige Entwickelungsbestrebungen darstellen. Die Ergebnisse dieser beiden wesentlichen Gedankenprozesse auf dem elektromagnetischen Gebiet sollen im Anschluss an die Beschreibung der als Thatsachen beobachteten Haupterscheinungen den ersten Teil dieses Bandes bilden, natürlich mit besonderer Berücksichtigung der Wichtigkeit für die Elektrotechnik.

Als eine gleichfalls gedankenökonomische Massregel muss die für die Formulierung der Gesetze erforderliche Bildung von Begriffen angesehen werden, mögen sie nun als Hauptbegriffe, wie z. B. Stromstärke, Spannung, Widerstand u. s. w. sogleich, oder als Nebenbegriffe, wie z. B. Wechselstromwiderstand (Impedanz) u. s. f. erst später mit besonderen Namen belegt werden, oder auch nur durch kombinierte Symbole zunächst ohne besondere Benennung — gewöhnlich pflegt die Einführung von solchen bei der Weiterentwickelung sich als wünschenswert herauszustellen — ausgedrückt sein. Diese Begriffsbildung und -benennung wird sonach in erster Linie von praktischen Gesichtspunkten beherrscht werden.

Die Darstellungsweise erfordert für die elektrotechnischen Bedürfnisse ähnlich wie bei den übrigen technischen Abzweigungen der (angewandten) Physik mehrfach eine Ergänzung der bisher fast ausschliesslich üblichen analytischen Beziehungen von begrifflichen Symbolen, wie sie in den Gleichungen vorliegen, durch weitere, namentlich graphische Darstellungsweisen.

Durch Herausschälung der Grundgesetze für Erscheinungs**gruppen** ist aber die Entwickelung einer Wissenschaft noch nicht zum Abschluss gelangt, vielmehr verlangen, wie schon oben angedeutet, diese Grundgesetze selbst eine möglichst weitgehende Verbindung untereinander. Bei dieser Gedankenverbindung der Einzelerscheinungen untereinander, die durch das oben erwähnte Ökonomiebestreben beherrscht wird, stellen die experimentell jederzeit nachprüfbaren Erfahrungsthatsachen gleichsam offen daliegende Kanäle oder Bahnen dar, welche sich vielfach nur bis zu einem gewissen Punkte verfolgen lassen, um dann in ein verdecktes Gebiet einzutreten. Die gedanklichen Verbindungsbahnen innerhalb dieses verdeckten Gebietes so zu konstruieren, dass ein richtiger Anschluss an die Enden der offenen Zuführungsbahnen, das ist die Erfahrungsthatsachen, gewährleistet wird, ist eben Aufgabe der Wissenschaft, so dass ihr Ziel sich gleichsam als eindeutige Lösung des wirklichen Verlaufs aller jener verdeckten Bahnen darstellt. Solche verdeckte Gebiete sind nun bei jeder Wissenschaft dort vorhanden, wo einer unmittelbaren Beobachtung durch die Sinne Grenzen gezogen sind, also z. B. stets da, wo die weitere Verfolgung bezw. Erklärung der Erscheinung auf sogenannte molekulare,

d. h. unter der Grenze der mit den jetzigen Mitteln erreichbaren Sichtbarkeit befindliche Vorgänge stösst. In allen diesen Fällen ist bei der gegenwärtig gegebenen Konstruktion unseres Denkapparates eine gewisse innere Vorstellung, und zwar mechanischer Natur, unerlässlich, und es kann als unleugbare Behauptung gelten, dass dieselbe bewusst oder unbewusst, geklärt oder ungeklärt im Untergrunde stets vorhanden ist und gleichsam eine naturnotwendige Auffassungsform bildet.[1])

Bei der besonders für die Technik gebotenen Anknüpfung an die Erscheinungswelt kann die Benutzung gewisser mechanischer Grundvorstellungen als notwendig betrachtet werden. Zwecks einer einheitlichen Zusammenfassung aller elektrischen Erscheinungsgebiete, sowie des Versuches einer wissenschaftlichen Ableitung konnte sich die Elektrizitätslehre daher ebensowenig einer Bildung gewisser Grundvorstellungen entziehen als die übrige Physik und die Chemie, welche zu der auch jetzt noch unentbehrlichen mechanischen Hülfsvorstellung der Moleküle und Atome gedrängt wurden. Diese Hülfsvorstellungen haben natürlich auf elektrischem und magnetischem Gebiet, ebenso wie auf jedem anderen eine gewisse Entwickelung durchgemacht und sich je nach dem Stande der Erfahrungsthatsachen und der fortschreitenden wissenschaftlichen Erkenntnis sehr erheblich geändert, so namentlich hier nach der Erkenntnis des eigentlich untrennbaren Zusammenhanges der elektromagnetischen Erscheinungen, sowie deren engem Zusammenhang mit den Lichterscheinungen. Obwohl in erster Linie geeignet die verschiedenartigen Erscheinungsgruppen qualitativ in Verbindung zu bringen, drängen sie auf der anderen Seite zur Ausbildung einer Theorie, d. h. zur Ausbildung von quantitativen Grundgleichungen, welche gestatten, auf theoretisch-mathematischem Wege unter Zugrundelegung möglichst weniger Erfahrungsthatsachen bezw. Grundgesetze alle weiteren Erscheinungen und Gesetze durch Deduktion abzuleiten. Dieses Bestreben, sich jenem oben erwähnten Ziel der Wissenschaft soweit als möglich zu nähern, darf aber nicht dazu führen, jenes Zwischenglied zwischen den Erfahrungsthatsachen und der entwickelten Theorie überhaupt, oder zum mindesten vorzeitig, über Bord zu werfen, denn die mathematische Formel ist zwar der letzte Ausdruck der durch die Wissenschaft erstrebten Ordnung (vgl. **47** im Abschnitt Hülfsvorstellungen), bedingt aber gerade wegen ihrer grossen Allgemeinheit einen hohen Grad von Abstraktion und unterliegt dem überall in der Begriffswelt geltenden Gesetz: je allgemeiner und weitgreifender, um so ergänzungsbedürftiger beim Zusammenbringen mit dem Einzellfall. Allerdings besitzen ja jene mechanischen Hülfsvorstellungen für den mathematischen Theoretiker einen ihm unbequemen Mangel an Exaktheit und damit in seinen Augen an Wissenschaftlichkeit, weshalb er bestrebt ist, sie sobald als möglich als überwundenen Standpunkt und als nicht mehr nötig ganz auszumerzen. Geschieht dies aber vorzeitig, so entsteht, wie gegenwärtig auf dem Gebiet des Elektromagne-

---

1) Die Notwendigkeit dieser mechanischen Hülfsvorstellungen mag ja vielleicht von einem gewissen wissenschaftlichen Standpunkt aus als eine Art sensuzentrischer Irrtum angesehen und ähnlich dem bereits überwundenen geozentrischen und anthropozentrischen Irrtum (d. h. die Erde nnd den Menschen als Schöpfungsmittelpunkt betrachtenden) als bekämpfenswert erscheinen. Ob es aber gelingen wird, das Sinnen-Ich auch aus seiner vorläufig behaupteten Mittelpunktstellung zu verdrängen, ist eine hier nicht weiter diskutierbare und mit dem Dinge an sich zusammengehörige wissenschaftliche Glaubenssache.

tismus, zwischen den Erfahrungsthatsachen und der mathematischen Entwickelung der MAXWELLschen Theorie eine so erhebliche Lücke, dass für die Allgemeinheit nicht nur der Studierenden, sondern auch aller praktisch, d. h. mechanisch anschaulich zu denken gewohnter Techniker der Schaden durch geringeres Verständnis unberechenbar gross wird, und der gewonnene, scheinbar höhere Grad von Wissenschaftlichkeit für sie in gar keinem Verhältnis dazu steht. Das Ergebnis der einseitigen Verfolgung einer solchen rein mathematischen und die zwischenliegenden nicht völlig exakten Hülfsmittel verachtenden Richtung von Seiten der technischen Wissenschaft würde voraussichtlich darin bestehen, immer mehr Techniker durch jene wissenschaftliche Schroffheit in das Lager der sogenannten „reinen Praktiker" zu treiben, welche geneigt sind sich in Überschätzung der „Gefühlserfolge" auf technischem, besonders auf elektrotechnischem Gebiet über die „unpraktische Wissenschaft" lustig zu machen. Hierdurch würde aber die Ausbildung von Ingenieuren mit wahrhaft technischer Bildung im guten Sinne des Wortes erschwert, d. h. die Zahl solcher verringert und das Gesamtniveau der technischen Wissenschaft herabgedrückt werden.

Da somit für ein besseres Verständnis der im letzten Teil des ersten Bandes folgenden Entwickelung der elektromagnetischen Theorie, namentlich der MAXWELLschen mit ihrer weiteren Ausbildung durch HERTZ und HELMHOLTZ, das Zwischenglied der mechanischen Hülfsvorstellungen geradezu unerlässlich und auch sonst für die geistige Förderung des Technikers von grosser Bedeutung sein dürfte, so sind in dem auf die „Entwickelung" folgenden zweiten Abschnitt die auf die elektromagnetischen Erscheinungen bezüglichen mechanischen Hülfsvorstellungen, wie sie im Anschluss an die MAXWELLschen Grundvorstellungen u. a. auch vom Herausgeber ausgebildet wurden, etwas eingehender behandelt. Dies schien um so ratsamer, weil sonst zu befürchten wäre, dass ohne dieses mechanische Verbindungsglied bei der nun einmal gegenwärtig bestehenden Abneigung der Techniker und namentlich der Praktiker gegen abstrakte mathematische Entwickelungen das Interesse für die wichtigen theoretischen Entwickelungen des letzten Abschnittes zu stark leiden würde, obwohl die letzteren von ihrem Verfasser eine besonders für Techniker berechnete neue Ableitung und Darstellung erfahren haben.

Was die Behandlung des anschliessenden Hauptteiles in diesem Bande, der elektromagnetischen Erscheinungen, betrifft, so sei zur Begründung der gewählten Stoffanordnung folgendes vorausgeschickt. Bei der Darstellung von Erscheinungsgebieten, die eine grosse Mannigfaltigkeit darbieten, werden die Gesichtspunkte für die Anordnung des Stoffes gleichfalls nicht eindeutig auf eine ganz bestimmte Reihenfolge hinweisen; ausserdem wird der Standpunkt mit der geschichtlichen Entwickelung wechseln und von Zeit zu Zeit Neuordnungen empfehlenswert erscheinen lassen. Die durch eine bestimmte geschichtliche Entwickelung bedingte traditionelle Anordnung wird nämlich mit der Zeit zu einem Hemmnis mit überwiegenden Nachteilen werden können, insofern sie die Übersicht vom neueren Standpunkt aus erschwert. Aus diesem Grunde ist in neuerer Zeit mehrfach darüber diskutiert worden, ob die sogenannte Elektrostatik voranzustellen sei, wie dies früher stets geschah, oder ob auf Grund der neueren Anschauungen nicht die Elektrodynamik, gegenwärtig auch als Elektrokinetik bezeichnet, besser zuerst zu behandeln wäre und ihr die Elektrostatik zu folgen hätte. In letzterem Falle bleibt bei dem innigen Zusammenhange von Elektrizität und Magnetis-

mus noch die Frage übrig, welches von den beiden letzteren Gebieten bei einer systematischen Anordnung die Vorhand beanspruchen solle, zumal man früher innerhalb des Magnetismus wohl stets die Erscheinungen der permanenten Magnete an die Spitze stellte, wie es der geschichtlichen Entwickelung entsprach.

Eine weitere Frage wäre vielleicht noch die, ob es sich nicht überhaupt empfehle die historische Darstellung zu wählen, d. h. für die Folge in der Behandlung der Erscheinungen die geschichtliche Entwickelung zu Grunde zu legen, eine Stoffanordnung, zu deren Gunsten wohl einige Argumente beizubringen wären. Für den gegenwärtigen Stand des elektrisch-magnetischen Wissensgebietes, sowie namentlich auch für den vorliegenden Zweck erschien aber das letztere Verfahren ungeeignet. Einmal hat die Auffassung in den letzten Jahrzehnten eine so grosse Umwälzung erfahren, dass eine Vermengung der älteren geschichtlichen Teile mit den neueren leicht verwirrend wirken kann, und ein zweites Mal ist für den Elektrotechniker aus praktischen Gründen eine schärfere Trennung zwischen der geschichtlichen, d. h. auf die Entwickelung bezüglichen Darstellung und der aktuellen Hauptdarstellung erwünscht (vgl. Ankündigung des Handbuches).

Bei der Darstellung des gegenwärtig wichtigen Wissensstandes wurde nun als Entscheidung für die Reihenfolge der oben bezeichneten Untergebiete ein Gesichtspunkt gewählt, der sich für keine der bisherigen Anordnungen einseitig entscheidet, sondern unabhängig von diesen vorgeht.

Was zunächst die Frage zwischen Elektrizität und Magnetismus betrifft, so schien die neuere Wissensmehrung über magnetische Hysteresis und dergleichen unzweideutig darauf hinzuweisen, dass der sogenannte permanente Magnetismus von seiner bisherigen führenden Stellung auf magnetischem Gebiet zurücktreten müsse, insofern alle Erscheinungen des permanenten Magnetismus als eine sekundäre Resterscheinung dem primären Elektromagnetismus die Vorhand zu lassen haben. Das Verständnis für das richtige Verhältnis der Teilgebiete unter sich sowie zum elektrisch-magnetischen Gesamtgebiet dürfte durch diese Darstellung unterstützt werden. Hierzu kam noch, dass dies auch der durchgehends benutzte Gesichtspunkt für die Stoffanordnung dieses Gesamtgebietes verlangte. Als letzterer diente nämlich das Bestreben, die Erscheinungen in der Reihenfolge von den weniger zu den mehr bedingten zu behandeln. Aus diesem Grunde werden die verschiedenen Ursachen für Erzeugung des elektrischen Spannungszustandes zuerst behandelt unter Anschluss der hiermit in Verbindung stehenden dielektrischen Erscheinungen; die Erscheinungen des elektrischen Ausgleiches (Strömungserscheinungen) nebst allen zugehörigen werden im folgenden umfangreichsten Abschnitt angeschlossen, weil für das Eintreten derselben neben der Erzeugung eines elektrischen Spannungszustandes als der einen unerlässlichen Bedingung noch eine weitere erforderlich ist. Gegenüber dem vorausgegangenen Abschnitt wird diese neu hinzutretende Bedingung in dem Vorhandensein zusammenhängender Leitermassen bestehen, welche einen leitenden Kreislauf für den elektrischen Ausgleich (Strom) darbieten, sowie weiterhin, was die quantitativen Ausgleichverhältnisse anlangt, von der Energiemenge abhängen, welche zur Überführung in elektrische Energie verfügbar ist. Nach den mit dem elektrischen Ausgleich untrennbar verknüpften allgemeinen magnetischen Erscheinungen werden sodann (im fünften Abschnitt) die speziellen elektromagnetischen Erscheinungen, d. h. diejenigen bei Vorhandensein bestimmter

Materialien (der sogenannten magnetischen Metalle) im Leiterfeld behandelt und hieran wiederum die Resterscheinungen bei Materialien mit stärkerem Hervortreten einer bestimmten magnetischen Eigenschaft, der magnetischen Molekularreibung (Hysteresis), d. h. die sogenannten permanenten Magnete angeschlossen. Bei diesen sich so ergebenden drei Hauptabschnitten, die elektrische Spannung (dritter Abschnitt von Band I), die elektrischen Ausgleichvorgänge (vierter Abschnitt) und die ferromagnetischen Erscheinungen (fünfter Abschnitt) wurde die weitere Unterteilung gewählt, wie sie aus der disponierenden Inhaltsangabe ersichtlich ist, wobei mehr oder weniger leicht erkennbare Gründe der Zweckmässigkeit für die vorliegende Anordnung massgebend waren.

Jede systematische Darstellung wird sich naturgemäss nicht auf die beobachteten Thatsachen und Erscheinungen selbst beschränken, sondern auch die zur gedanklichen Bewältigung des Erscheinungsgebietes gebildeten Begriffe, sowie ferner die Verbindung der Begriffe zu behandeln haben; die Unabgeschlossenheit des Thatsachenmaterials und die ständige Weiterentwickelung des Wissensgebietes wird hierbei die Behandlung nicht nur völlig gesicherter und gleichsam abgeschlossener Formulierungen (Gesetze), sondern auch von Annäherungsformeln sowie von mehr oder weniger strittigen Formulierungen erheischen, ja die letzteren können mit ihrem Für und Wider zuweilen grösseren Raum beanspruchen als jene. Dass neben dem qualitativen Zusammenhang auch die quantitativen Beziehungen Berücksichtigung verlangen, ist bei der Technik besonders einleuchtend.

Für die Darstellung werden vielfach neben der analytischen Formulierung auch andere Analogien, wie graphische, mechanische oder auch elektrische bezw. magnetische Verwendung finden, da diese Hülfsmittel für eine schnellere Verständigung über die darzustellende Erscheinungsseite oft ökonomischen Wert besitzen. Die Hinlenkung der Gedanken vieler Leser auf bestimmte vom Darsteller gewünschte Punkte werden vielfach hierdurch nicht nur rascher, sondern auch sicherer erfolgen können und für eine grosse Anzahl wird vielfach ein derartiges Hülfsmittel die Gedankenbahn gleichsam zwangläufiger gestalten können als eine allgemeinere, aber abstraktere Darstellung. Da eine zu grosse Einschränkung der zulässigen Hülfsmittel sonach namentlich bei Technikern mehr Schaden als Nutzen stiften dürfte, so wurde die Benutzung derartiger Hülfsvorstellungen auch bei der Darstellung in den letztgenannten Abschnitten nicht verschmäht.

Obwohl die besondere Berücksichtigung der technisch wichtigen Erscheinungsseiten auch hier angestrebt wurde, so werden doch die übrigen zur Ergänzung nicht völlig unerwähnt bleiben; dies schon deshalb, weil man sich davor zu hüten hat, bei jenen die Grenze zu eng zu ziehen, da z. B. die Ausbreitung der hochgespannten Wechselstromtechnik sich auf immer weitere Erscheinungsgruppen erstreckt und bereits jetzt vielfach mit älteren Erscheinungen der Reibungselektrizität sowie mit anfangs nur elektrostatisch wichtigen Punkten in Berührung tritt; es sei in dieser Hinsicht nur an die dielektrischen Vorgänge bei Hochspannungskabeln erinnert, welche neuerdings technische Wichtigkeit erlangt haben.

Erster Abschnitt.

Die Entwickelung der Elektrophysik.

Vorbemerkung. Die nachstehende geschichtliche Zusammenstellung will natürlich keine erschöpfende Darlegung der geschichtlichen Entwickelung geben, weshalb für näheres Studium teils auf die Originalabhandlungen, teils auf die auch hier mehrfach benutzten Werke von E. HOPPE: Geschichte der Elektrizität, Leipzig bei A. BARTH, sowie OSTWALD: Geschichte der Elektrochemie, Leipzig bei VEIT & Co., ferner für den letzten Abschnitt ROSENBERGER: Die moderne Entwickelung der elektrischen Prinzipien, verwiesen sein möge. Dennoch schien zur Einführung in diesen Band ein entwickelungsgeschichtlicher Abschnitt unerlässlich. Dem hier behandelten Gegenstand entsprechend, wird auch hier das Physikalische im Vordergrund zu stehen haben, aber doch teilweise vom technischen Standpunkte aus gesehen. Jede geschichtliche Betrachtung wird zwar einerseits den Verfasser zu dem Versuche reizen, den Leser möglichst in die damaligen, für uns verhältnismässig naiven Auffassungen zu versetzen, wird ihn aber andererseits auch zu einer kritischen Sichtung und Wertschätzung vom Standpunkte unserer heutigen Auffassung, sowie hier mit Rücksicht auf das Ziel des vorliegenden Gesamtwerkes von einem mehr technischen Standpunkte aus geradezu auffordern. Es empfahl sich daher, bei den — früher gerade so wie jetzt — in buntem Wechsel erfolgenden Fortschritten eine Sichtung nach Gebieten, und eine solche sachliche Einteilung erschien durch folgende Unterscheidungen gegeben, welche zum Teil auch bei der Bearbeitung der übrigen Teile von Band 1 verwendet worden:

1) Erzeugung des elektrischen Spannungszustandes und dielektrische Vorgänge.
2) Elektrische Ausgleicherscheinungen und elektrische Bewegungswiderstände.
3) Benutzung der Ausgleichwirkungen zu Messzwecken.
4) Auffassung der elektrischen Vorgänge nebst Hülfsvorstellungen und Bezeichnungen.
5) Mathematische Behandlung der Erscheinungen und Darstellung der Beziehungen.

Diese Einteilung wurde vom Jahre 1750 an benutzt und auch bei denjenigen Erscheinungen beibehalten, welche wie die reibungselektrischen für die heutige Technik ohne unmittelbare Bedeutung sind, aber für die Entwickelung und für ein besseres Verständnis des Gewordenen einen gewissen unersetzlichen Wert besitzen. Da die bleibenden wichtigeren Forschungsergebnisse noch im Hauptteil dieses Bandes eingehender berücksichtigt werden, so ist erstens in diesem geschichtlichen Kapitel ein oftmals nur kürzerer Hinweis ausreichend, und zweitens brauchte die geschichtliche Übersicht nicht in derselben Ausführlichkeit bis auf die neueste Zeit fortgesetzt zu werden, wenn auch gelegentlich einzelne hierauf bezügliche Bemerkungen erwünscht erschienen, namentlich bei später nicht eingehender behandelten Gebieten. Ein gewisses Gewicht wurde darauf gelegt, die auch für die Elektrotechnik in mancher Hinsicht klassischen Stellen, wo ohne zu grosse Belastung dieses Abschnittes angängig, im Wortlaut anzuführen, um dem Leser den eigenen Reiz der Unmittelbarkeit, welcher solchen Stellen anzuhaften pflegt, wenigstens in den wichtigsten Fällen zu bieten. Da von den technischen Gebieten noch jedes seine eigene geschichtliche Einleitung hat, war hier eine Einschränkung auf die physikalischen Grundlagen vorgezeichnet.

1. [illegible]

Alles Geschehene kann nach naturwissenschaftlicher Auffassung nur durch das Thor der Sinne zu unserem Bewusstsein gelangen. Dementsprechend mussten auch alle Vorgänge, welche dem Gebiet des heutigen Elektromagnetismus in seiner weiteren Fassung angehören, zuerst durch ihre Sinnenwirkung die Aufmerksamkeit erregen und entdeckt werden. Die am meisten entwickelten Sinneszweige, wie das Gesicht und das Gehör, vermitteln aber die Kenntnis elektrischer und magnetischer Zustände nicht unmittelbar, sondern nur mittelbar durch Wirkungen, wie Massenbewegungen (ponderomotorische Wirkungen), Wärme- oder Lichterscheinungen, welche durch jene Zustände verursacht werden. Allerdings ist auch eine direkte physiologische Wirkung bei dem Ausgleich genügend grosser Elektrizitätsmengen durch Teile des menschlichen Körpers vorhanden und deutet auf die vermutlich elektrische Natur bei allen im menschlichen Körper verlaufenden Nervenprozessen. Von den durch die physiologische Wirkung gegebenen wichtigen indirekten Anregungen, namentlich bei der Entwickelung des Galvanismus, abgesehen spielt aber für die Erweiterung unserer elektrophysikalischen Kenntnisse die direkte Wahrnehmung elektrischer Zustände wegen ihrer grossen Beschränkung in qualitativer Hinsicht und der Mangelhaftigkeit ihrer Benutzung zu quantitativen Bestimmungen eine ganz untergeordnete Rolle. Bleiben die durch den menschlichen Körper zum Ausgleich gelangenden Elektrizitätsmengen, sei es infolge zu kleiner elektrischer Spannung, sei es infolge zu kleiner Menge der gespannten Elektrizität unter einer gewissen Grenze, so versagt diese Quelle der Wahrnehmung wegen der geringen Entwickelung des menschlichen Allgemeingefühls nach dieser Richtung. In quantitativer Beziehung, also in Verwertung dieses Gefühles als Messmittel, d. i. als Merkzeichen für elektrische Strömungs- bezw. Spannungszustände, ist die Beschränkung fast noch grösser, abgesehen von den grossen individuellen Verschiedenheiten in der Empfindlichkeit und der Fälschung durch subjektive Kontrastwirkungen, sowie endlich der für den Organismus bestehenden Gefahr bei Überschreitung einer ziemlich tief liegenden Grenze der durch den Körper geleiteten elektrischen Energie.

Die physiologischen Wahrnehmungen bei dem Ausgleich von künstlich in Spannungszustand versetzter Elektrizität haben jedoch mit dazu beigetragen, dass ihre Verwandtschaft mit den Blitzwirkungen zunächst den elektrischen Charakter dieser naturgemäss ältesten Beobachtung eines elektrischen Vorganges mutmassen liess und dadurch schliesslich zur Erkenntnis und Einordnung dieser Erscheinungen geführt. Diese durch die Natur ohne menschliches Zuthun gebotenen Beobachtungen der Gewitterelektrizität bleiben aber auch deshalb hier zunächst ausser Betracht, weil sie eine in Gestalt von stets wieder vorzunehmenden Versuchen mögliche Fragestellung mit daraus folgender Erkenntnis ausschlossen. Es erscheint nach dem Gesagten sehr erklärlich, dass die durch Menschen verursachten elektrischen Vorgänge nicht durch ihre physiologische Wirkung direkt zur Beobachtung gelangten. Thatsächlich wurde die erste, Jahrhunderte vor unserer Zeitrechnung gemachte elektrische Beobachtung auch durch die ponderomotorischen Wirkungen veranlasst.

2. **Die ersten elektrischen Erfahrungsthatsachen.**

(Erste Anfänge bis 1720.) Die Thatsache, dass Bernstein (Elektron) durch Reiben die Eigenschaft erlangt leichte Körper anzuziehen, blieb aber mehr als 2000 Jahre vereinzelt, und es erscheint bei dem Fehlen jeder Analogie und dem Bedürfnis des menschlichen Geistes neu auftretende Natur-

erscheinungen durch Vergleichung den übrigen Erfahrungen anzugliedern nicht verwunderlich, dass THALES (580 v. Chr.) diese Anziehung einer Art Willensäusserung zuschrieb und etwas wie Leben im Bernstein annahm. Obwohl auch im folgenden immer streng zwischen den thatsächlichen Beobachtungen einerseits, den daraus gezogenen Schlüssen, damit verknüpften Vorstellungen, oder überhaupt der hinzugefügten Gedankenarbeit andererseits, zu unterscheiden sein wird, so bieten doch nicht nur die ersteren, sondern auch die letzteren für die Geschichte der Wissenschaft Interesse; sie gestatten nämlich Rückschlüsse auf die geistige Verfassung einer früheren Zeit, deren Vorstellung für unseren heutigen Entwickelungszustand sonst sehr erschwert, wenn nicht unmöglich wäre. Diese Vorstellungen sollen daher im Zusammenhang in dem Abschnitt über Hülfsvorstellungen behandelt werden.

Die zuerst am Bernstein und später auch am Gagat beobachtete Eigenschaft wurde wegen der äusseren Ähnlichkeit mit den gleichfalls als Fernwirkung erscheinenden ponderomotorischen Wirkungen des Magnetismus zusammengefasst. Erst der englische Arzt GILBERT (1628) erweiterte das Wissen über die elektrischen Erscheinungen, indem er die verschiedensten Stoffe auf ihr Elektrischwerden durch Reibung untersuchte und gleichzeitig Magnetismus und Elektrizität unter Einführung des Namens Vis electrica für die durch Reibung erzeugten Erscheinungen am Bernstein (Elektron) scharf voneinander unterschied. Diese Trennung bestand ohne jede Verbindung fort, bis endlich OERSTEDT und AMPÈRE durch ihre Entdeckungen einen Zusammenhang ganz anderer Art auffanden, der sich im weiteren als so tiefgreifend erwies, dass nach der heutigen Auffassung die Verkettung der elektrisch-magnetischen Erscheinungen inniger als je zuvor erscheint, trotzdem die ursprüngliche äusserliche Ähnlichkeit von GILBERT richtig nur als Scheinverwandtschaft erkannt wurde.

Die von GILBERT vorgenommene Trennung aller Körper in zwei Klassen, nämlich solche, welche durch Reiben elektrisch werden, und solche, welche dies nicht werden, stellt sich uns heute nur als eine verschieden gute Isolationsfähigkeit des auf ihnen erregten elektrischen Spannungszustandes dar. Hierbei ist der letztere allerdings auch je nach den leitenden Körpern verschieden stark und, wie erst erheblich später entdeckt wurde, entgegengesetzter Art. Ohne den viel später von GRAY (1729) entdeckten Unterschied zwischen elektrischen Leitern und Isolatoren zu kennen, wurde derselbe doch bereits von GILBERT vorbereitet durch die Beobachtung des Einflusses der Luftfeuchtigkeit auf die Elektrizitätserregung bezw. -erhaltung, sowie die Vernichtung dieses Zustandes durch Brennen oder Rösten. Ebenso ist GILBERT der Erfinder des ersten elektrischen Messinstrumentes (Elektrometers) zum Nachweis der Elektrisierung mittels Anziehung eines schwingenden Metallstäbchens, worin unbewusst auch die Influenzerscheinung aufgefunden war. Die Entdeckung der ableitenden Wirkung einer Flamme wurde 1667 in der florentinischen Akademie hinzugefügt, woselbst auch zuerst die Anziehung von Flüssigkeit durch elektrisierten Bernstein beobachtet wurde. Eine wesentliche, aber von seinen Zeitgenossen grösstenteils unverstandene Erweiterung der Kenntnisse über Elektrizität erfolgte durch OTTO VON GUERICKE, welcher die erste Elektrisiermaschine erfand (1663) in Gestalt einer um eine Achse rotierenden Schwefelkugel mit der dagegen gehaltenen Hand als Reibzeug. Hiermit gelang es ihm die elektrische Erregung soweit zu steigern, dass er die ersten elektrischen Ausgleicherscheinungen durch Knistern und

Leuchten wahrnahm, wenn auch die Steigerung bis zum eigentlichen elektrischen Funken von ihm wahrscheinlich noch nicht beobachtet wurde. Ferner vervollständigte er die Kenntnis der ponderomotorischen Wirkungen, indem er nicht nur Anziehung, sondern auch die Abstossung wahrnahm, welche nach erfolgtem Ausgleich oder nach der Übertragung des elektrischen Spannungszustandes auf den angezogenen leichten Körper eintritt. Weiterhin entdeckte er an einem Leinenfaden, dass am anderen (freien) Ende Elektrisierung auftrat, wenn das eine Ende mit der als Elektrisiervorrichtung dienenden Schwefelkugel verbunden wurde; auch wenn keine direkte Verbindung, sondern nur Annäherung stattfand, konnte er Elektrisierung beobachten, d. h. er nahm die Erscheinungen der Leitung und Influenz wahr. Die Beiderseitigkeit der Anziehung zwischen geriebenem Bernstein und anderen Körpern beobachtete zuerst Boyle (1675). Die elektrische Ausgleicherscheinung in Gestalt eines — nach Angabe mehr als 1 cm langen — Funkens, welcher aus einem geriebenen grösseren Stück Bernstein unter der Begleiterscheinung eines Knalles auf den Finger des Experimentators übersprang und bei ihm eine stossartig empfundene physiologische Wirkung hervorbrachte, soll zuerst von dem Engländer Wall (ums Jahr 1700) beobachtet und auch sogleich richtig mit der Erscheinung von Blitz und Donner verglichen worden sein; natürlich erfolgte der Vergleich zunächst rein auf Grund der Erscheinungsverwandtschaft, ohne weitere klare Vorstellung über die Entstehung der Funkenbildung.

Die Leuchterscheinungen, welche beim Ausgleich elektrischer Ladungen durch verdünnte Gase (sogenannte Gasentladungen) auftreten, wurden im Vakuum des Quecksilberbarometers nach einer zufälligen Beobachtung von Picard im Jahre 1675 zuerst von Walls Zeitgenossen Hawksbee (1705) gedeutet und unter Verwendung einer Glaskugel als Elektrisiermaschine etwas näher untersucht und gesteigert. Die bis zum Anfang des 18. Jahrhunderts gemachten Entdeckungen stellen aber eigentlich nur eine unzusammenhängende Anzahl von Einzelbeobachtungen dar, welche eine Bildung auch nur der fundamentalsten Begriffe noch nicht gestatteten.

3. Die ersten grundlegenden Unterscheidungen.

(1720—1750.) Die erste wichtige begriffliche Trennung auf Grund vielfacher Versuche (vgl. Hoppe, § 11), welche die bewusste Aufstellung des Unterschieds zwischen Leitern und Nichtleitern zur Folge hatten, wurde von Stephan Gray (1729) vorgenommen. Die Beobachtung der Influenzerscheinungen bei allen Leitern schloss sich hieran an und so wurde z. B. unter erstmaliger Verwendung eines Isolierschemels die Leitungsfähigkeit des tierischen Körpers aus den Influenzerscheinungen nachgewiesen (Hoppe, § 12). Im Anschluss an diese Versuche wurde die Kenntnis der elektrischen Erscheinungen namentlich durch den Franzosen du Fay (1734) gefördert, der neben Erweiterung und Vervollständigung der Grayschen Beobachtungen über Leiter und Nichtleiter, sowie über Influenz, die Leitungsfähigkeit der Flamme entdeckte. Seine wichtigste Entdeckung bildet aber die Gegensätzlichkeit in dem ponderomotorischen Verhalten der „glashaften" und „harzigen" Elektrizität, eine Trennung, welche auch heute noch bei aller innern Wahrscheinlichkeit einer einheitlichen Elektrizität (vgl. Hülfsvorstellungen) grosse Vorzüge hinsichtlich der Bequemlichkeit der Bezeichnung und der Übermittelung bietet. Diese nunmehr häufiger unter dem Namen: „positive" und „negative" Elektrizität bekannte Trennung wird stets als fundamentale Gegensätzlichkeit von positiv und negativ elektrischem Spannungszustand bestehen bleiben.

Die hierauf namentlich in Deutschland mit Erfolg gepflegte Elektrizitätswissenschaft führte zur definitiven Benutzung von Glaselektrisiermaschinen zur Erzeugung von Reibungselektrizität (LITZENDORF und HANSEN 1743), unter Hinzufügung des anfangs als Eisenblechröhre ausgebildeten sogenannten Konduktors durch BOSE, also des ersten Sammelapparates. Auf letzterem wurde die Elektrizität von der zunächst noch mit der Hand geriebenen Glaskugel mittels eines Bündels Fäden übergeführt, welches in der Nähe der Glaskugel, dieselbe nahezu berührend endigte und den Vorläufer unserer Metallspitzenkämme bildete. Das an Stelle der Hand tretende Reibzeug wurde erst durch WINKLER (1744) hinzugefügt. Die hierdurch erzielte Steigerung der Elektrizitätserregung gestattete beim Ausgleich in Form des elektrischen Funkens so starke Wärmewirkungen, dass die Entzündung von Schwefeläther, Weingeist und dergleichen mehr gelang, wodurch gleichsam die erste Art von technischer Anwendung der elektrischen Ausgleichwirkungen, wie sie bei der heutigen Minenzündung oder den Gaszündern noch Verwendung findet, angebahnt wurde, wenn man nicht neben der auf Influenz beruhenden Spielerei des sogenannten elektrischen Glockenspieles, das bereits etwas früher von GORDON erfundene elektrische „Flugrad“ als ersten technischen Ansatz gelten lassen will. In diesem Falle müsste man das letztere als einen auf Spitzenwirkung beruhenden Elektromotor, oder wenigstens Rotationsmechanismus auffassen, dessen Wirkungsweise analog dem HERONschen Wassermotor wäre, bei welchem die Reaktion des ausströmenden Wassers die Bewegung veranlasst.

Fast in dieselbe Zeit fällt auch die Erfindung des Kondensators in seiner ersten Gestalt, der Leydener oder richtiger KLEISTschen Flasche, durch KLEIST im Oktober 1745 zu Camin in Pommern und wenige Monate später, unabhängig hiervon und gleichfalls durch Zufall herbeigeführt, durch CUNAEUS und MUSCHENBROEK in Leyden. Der oben erwähnte Konduktor stellt zwar auch eine Art Kondensator dar, welcher durch seine Kapazität gegen die Erde beziehungsweise gegen die mit der reibenden Hand des Experimentators durch dessen Körper leitend verbundene Zimmerumgebung als der anderen Belegung wirkt. Die Verwendung von zwei durch eine verhältnismässig dünne Isolationsschicht (Glaswand) getrennten leitenden Belegungen, um elektrische Energie in Form von statischer Spannungselektrizität aufsammeln und die anschliessenden Ausgleichwirkungen steigern zu können, nimmt aber mit der KLEISTschen Flasche ihren Ausgangspunkt. Von den beiden wichtigsten Schaltungsarten der Elektrotechnik, der Parallel- und Serienschaltung, zur Steigerung der Wirkungen in dem einen oder anderen Sinne, wurde die erstere bei Benutzung dieser Sammelapparate erfunden und regte offenbar später VOLTA zur Erfindung der zweiten Schaltungsart für seine Säulenanordnung an (vgl. **10**). Es scheint, dass die Parallelschaltung von mehreren KLEISTschen Flaschen zuerst durch WINKLER 1746 (vgl. HOPPE, § 22) vorgenommen und zu Untersuchungen über die Ausgleicherscheinungen bei Entladung benutzt wurde. Namentlich wurden hiermit Beobachtungen über physiologische Wirkungen, sowie über Leitungsfähigkeit zwischengeschalteter Gegenstände gemacht. Naturgemäss wurden bei dem Operieren mit Ladungen von mehreren Tausend Volt Spannung, wie sie bei diesen Reibungserscheinungen auftreten, die grossen Unterschiede der Leitungsfähigkeit, wie sie der galvanische Strom sofort erkennen lässt, zunächst nicht aufgefunden; vielmehr erschienen alle überhaupt nur einiger-

massen leitenden Gegenstände, wie z. B. grosse eingeschaltete Wasserstrecken und dergleichen als ebenso gute Leiter wie Metalle. Um dieselbe Zeit (1746) fällt der erste Ansatz zur gesetzmässigen Formulierung elektrischer Erscheinungen, nämlich die Erkenntnis, dass die angesammelte Elektrizitätsmenge mit der Grösse der Belegungen direkt proportional, mit der Dicke der isolierenden Zwischenschicht umgekehrt proportional sei, wobei stillschweigend gleiche Spannung vorausgesetzt wurde. Dieses durch Wilson (1746) ausgesprochene Gesetz, wurde allerdings erst 1773 durch Cavendish experimentell bewiesen. Die Erscheinung des „elektrischen Rückstandes" wurde durch Wilson, ebenso durch Winkler, vielleicht auch durch Gralath in diesen Jahren entdeckt. Die auch damals von Krüger gemachte Beobachtung der Entfärbung roter Mohnblätter durch den elektrischen Funken kann als erste Bemerkung einer chemischen Wirkung der Elektrizität gedeutet werden. Dass die Fortpflanzung des elektrischen Ausgleichvorganges, die sogenannte Geschwindigkeit der Elektrizität, so schnell vor sich ging, bezw. so gross war, dass auch bei sehr langen Leitungsstrecken die erforderliche Zeit nicht mehr gemessen werden konnte, wurde von Le Monnier (1746) und später von Watson festgestellt. Zu erwähnen wäre bei dieser Periode noch die vielfach mangelhafte Kenntnis bezw. Erkenntnis der anderwärts gemachten Fortschritte (vgl. Hoppe, § 28), worunter namentlich die deutschen Entdeckungen zu leiden hatten.

4. Die Zeit der ersten elektrischen Theorien.

(1750—1790). Eine einigermassen zusammenfassende Übersicht der reibungselektrischen Beobachtungen erfolgte erst um die Mitte des 18. Jahrhunderts durch den Amerikaner Franklin, der in den berühmt gewordenen Briefen an seinen englischen Freund Collinson die bisher bekannten, von ihm geprüften und erweiterten Experimente klar darstellte und zu einer einheitlichen Auffassung zu verarbeiten suchte, die als sogenannte unitarische Fluidumstheorie eine für die damalige Zeit höchst bedeutsame Hülfsvorstellung (vgl. Abschnitt II) und einen grossen wissenschaftlichen Fortschritt darstellt. Die von Franklin beobachtete und richtig dargestellte Spitzenwirkung bei elektrischen Ausgleichvorgängen durch die Luft führte ihn, unter endgiltiger Darlegung des elektrischen Charakters der Blitze, zur Erfindung des Blitzableiters, über dessen geeignete Ausführung und Anbringung sich alsbald ein heftiger Streit entspann, der eigentlich heute noch nicht als völlig gelöst gelten kann (vgl. die in gewisser Richtung epochemachenden Neuerungsvorschläge von Findeisen). Die allerdings schon vor Franklin von Winkler 1746 ausgesprochene Wesensgleichheit von Blitz und elektrischem Entladungsfunken, ebenso wie die Deutung des Nordlichtes als elektrische Erscheinung war nicht genügend beachtet worden.

Die allenthalben gesteigerte Beschäftigung mit elektrischen Versuchen in der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts förderten neben vielfachen, im Zeitgeist liegenden elektrischen Spielereien auch die Elektrizitätswissenschaft. Wenn das wissenschaftliche Hauptinteresse der Allgemeinheit massgebend wäre, so würde jene Zeit eigentlich den Beinamen des Zeitalters der Elektrizität verdienen, während die Gegenwart als Zeitalter der Elektrotechnik zu gelten hätte. Die im zweiten Abschnitt näher behandelten Hypothesen standen naturgemäss völlig unter dem alleinigen Zeichen der reibungselektrischen Erscheinungen. Namentlich in der Symmerschen dualistischen Theorie fand die auch heute noch vielfach benutzte Hülfsvorstellung der zwei elektrischen Fluida die weiteste Verbreitung. Hiervon abgesehen wurde aber auch eine

Reihe wichtiger neuer Erfindungen und Beobachtungen gemacht. Richtet man die letzteren bis zu dem naturgemässen, durch GALVANIS Entdeckung bezeichneten Schluss dieser Periode (1790) nach den am Kopf dieses Abschnittes angegebenen Gesichtspunkten, so kämen zunächst die Erzeugungsapparate elektrischer Spannung. Fürs erste beschränken sich diese noch auf Reibungselektrizität, d. h. sogenannte Elektrisiermaschinen. Es wurde früher (vgl. **2**) als zufällige Beobachtung erwähnt, dass durch Quecksilberreibung am Glase ein elektrischer Spannungszustand erzeugt wird, der durch die mit Glimmlicht verbundene Ausgleicherscheinung sein Dasein verriet. Dies führte CANTON (1762) auf den Gedanken die Elektrisiermaschinen durch Reibung zwischen Quecksilber und Glas zu verbessern. Daher wurde das Reibkissen mit Amalgam bestrichen, dessen beste Zusammensetzung nach vielen Versuchen wohl von KIENMAYER (1788) aufgefunden wurde. Der vorzeitige Ausgleich des erzeugten elektrischen Spannungszustandes wurde durch einen in der Drehrichtung hinter dem Reibzeug auf dem Glascylinder angebrachten Schutzlappen von Wachstaffet, später Seide, d. h. durch ein festeres Dielektrikum als Luft, erschwert (vgl. Fig. 27 in **81**). Die Doppelseitigkeit der Erscheinung, d. h. der negativ polare Spannungszustand des Reibzeuges gegenüber dem positiven der Glasscheibe wurde zuerst von PRIESTLEY erkannt und durch Isolierung des Reibzeuges beziehungsweise Verbindung mit der anderen Belegung der zu ladenden Batterie benutzt (1770). Der Ersatz des Glascylinders durch Glasscheiben, eine von Mehreren beanspruchte und vermutlich an mehreren Stellen unabhängig gemachte Verbesserung, steigerte die Wirkung der Erzeuger. Dies erfolgte sowohl durch die Möglichkeit der beiderseitigen Erregung mittels Reibkissen, als auch wohl durch die Steigerung der Umfangsgeschwindigkeit. Dass hiermit auch eine Entwickelung nach Richtung der Dimensionsvergrösserung der Maschinen verknüpft war, ist leicht erklärlich. Die grösste, damals als Monstrum angestaunte Maschine, die aus Mitteln des Harlemer TEYLER Museums vom Amsterdamer Mechaniker CUTHBERTSON (1785) gebaut worden war, ist namentlich durch die von MARUM angestellten Untersuchungen berühmt geworden. Die mit zwei Scheiben von je 1,65 m Durchmesser versehene Maschine lieferte Funkenentladungen von 60 cm Länge und wurde in Verbindung mit einer Flaschenbatterie von 21 qm Belegung zu interessanten Untersuchungen über elektrische Ausgleicherscheinungen benutzt (vgl. **6**).

Die in unserer Atmosphäre gegebenen natürlichen elektrischen Spannungen, sowie ihre durch meteorologische Einflüsse bewirkten Änderungen, wurden gleichfalls eifrig erforscht. Die Untersuchungen BECCARIAS über Luftelektrizität führten denselben zwar auf viel zu weitgehende Hypothesen über ihren Einfluss auf alle meteorologische Erscheinungen, vervollständigten aber die von CANTON, LE MONNIER und FRANKLIN gemachten Beobachtungen dahin, dass die Luft stets elektrisch und zwar gewöhnlich positiv elektrisch sei. LAVOISIER und LAPLACE fanden bei Versuchen zur Erklärung der Gewitterelektrizität (1780) die Elektrizitätserregung durch Verdampfung. Es ergab sich, was auch VOLTA (1782) anderweitig beobachtete, dass der Dampf positiv, das Gefäss negativ elektrisch wurde. Dass die Ursache dieser Elektrizitätserregung allerdings auch in der Reibung zu suchen sei, wurde erst durch FARADAY 1843 (Exp. Res. VIII), sowie REICH und RIESS im Jahre 1846 nachgewiesen.

5. Elektrische Sammelapp.

Die Erforschung der dielektrischen Verschiebungsvorgänge, d. h. die elektrostatischen Erscheinungen bei ungeschlossener Leiterbahn, also auch

der Influenzerscheinungen sind aufs Engste mit der Entwickelung der elektrischen Sammelapparate verknüpft. Die ponderomotorischen Wirkungen zwischen elektrisch geladenen, d. h. in Spannungszustand befindlichen Körpern, welche in gewisser Hinsicht den Übergang zu den elektrischen Ausgleicherscheinungen bilden (vgl. **110**), werden jedoch auch noch besser hier angeschlossen, wenn man die Ursache dieser Antriebe, das ist die Verschiedenheit des dielektrischen Spannungszustandes auf beiden Seiten des Körpers berücksichtigt.

Der seit 1757 in Petersburg lebende Deutsche Aepinus (1724—1802) kann als der bewusste Entdecker der Influenzelektrizität angesehen werden (vgl. Hoppe, § 41). Er wies ferner zuerst auf den wichtigen Umstand hin, dass die blosse Unterscheidung in Leiter und Nichtleiter eigentlich nicht genüge, sondern dass es sich im Grunde um verschieden grosse Widerstände gegen den elektrischen Ausgleich handle. Er erkannte auch (1756) die elektrische Natur der Erscheinungen am erhitzten Turmalin, das ist jene krystallelektrische Erscheinung, welche als Pyroelektrizität bezeichnet zu werden pflegt. Seine kaum beachtete Bemerkung über Leiter und Nichtleiter wurde durch den Italiener Beccaria (1769) auf Grund von Versuchen von neuem gemacht. Weitere Versuche mit der Franklinschen Tafel und die Erklärung der Influenzerscheinungen bei derselben mittels der Franklinschen Theorie führten zu einem energischen Widerspruche anderer Forscher. Hierunter befand sich auch Volta, der dadurch zur Ausbildung des sogenannten Elektrophors (1775) gelangte, wenn die eigentliche Erfindung nebst Theorie im Anschluss an Symmer jedenfalls auch dem Deutschen Wilke gebührt (vgl. Hoppe, § 57). Von letzterem wurde (1777) die Franklinsche + Elektrizität als „Feuer“, die — Elektrizität als „Säure“ bezeichnet, wofür Lichtenberg 1778 die auch jetzt noch üblichen Bezeichnungen positiv und negativ vorschlug.

Die Erfindung des Elektrophors kann als erster Ansatz der heute für alle reibungselektrischen Versuche wichtigen Influenzmaschine gelten, wenn man berücksichtigt, dass Volta von dem „Elektrophor“ zunächst durch Verringerung der Isolierschichtdicke zu dem sogenannten „Kondensator“ gelangte (1782). Diese Vorrichtung, welche aus zwei Metallplatten mit schwacher Isolierschicht, am besten Firnis, besteht, erfährt beim Abheben der einen Metallplatte (Belegung) eine Verkleinerung der Kapazität. Diese bewirkt eine Verdichtung der „elektrischen Atmosphäre“, d. h. eine Spannungssteigerung und gestattet kleine, elektroskopisch nicht, oder schwer nachweisbare Spannungswerte augenfällig zu machen. Die grosse Nähe der beiden als Belegungen wirkenden Platten bedingt beim Aufeinanderliegen eine verhältnismässig grosse Kapazität C und deshalb auch bei kleiner ladender Spannungsdifferenz E eine entsprechende, zur Ladung erforderliche Elektrizitätsmenge

$$Q = E \cdot C.$$

Wird durch isolierte Abhebung der einen Platte ihre nunmehrige Kapazität C' um ein Vielfaches verkleinert, so muss bei der Konstanz von Q die Spannung

$$E' = \frac{Q}{C'}$$

um das gleiche Vielfache vergrössert werden.

Diese auch von VOLTA schon völlig klar erkannte Wirkungsweise (vgl. OSTWALD, Kap. IV, § 4) führte zunächst zur Wiederholung dieser Steigerung durch das von BENNET (1787) angegebene „Duplikator“verfahren und weiterhin zu NICHOLSONS Duplikator (1788). Dieser auf mechanische Umdrehungen gegründete Verstärkungsapparat stellt im wesentlichen schon eine kleine Influenzmaschine dar (vgl. OSTWALD, Kap. IV, § 6 sowie **138**). Wegen der Empfindlichkeit ihres Ansprechens gaben diese Apparate aber oft zu störenden Fälschungen Veranlassung. Dieser Umstand brachte CAVALLO zur Anwendung des Luftkondensators (1788), d. h. er ersetzte das feste Dielektrikum bei VOLTAS Kondensator durch eine Luftschicht, welche zwar schwächer wirksam war als jene, dafür aber keine Fälschung durch unfreiwillige reibungselektrische Erregung veranlasste. Die durch die kleinere Dielektrizitätskonstante der Luft bedingte Ladungsverminderung der isolierten festen Platte, welche mit dem Elektroskop in Verbindung steht, wurde dadurch wieder ausgeglichen, dass sie b e i d e r s e i t i g von der abklappbaren anderen Metallbelegung umgeben wurde (vgl. OSTWALD, Fig. 38 u. 39). Dieses Durcheinandergreifen der Platten bezw. Belegungen führte unter Benutzung der schon von den Flaschenbatterien her bekannten Parallelschaltung zur Wiederholung jener Kondensatorelemente. So entstand später unser heutiger „Kondensator“, welcher in der Messtechnik und Schwachstromtechnik vielfach verwendet und für einzelne Fälle der Wechselstromtechnik gleichfalls vorgeschlagen wird, obwohl diese „Kondensatoren“ mit ihren nunmehr unverrückbaren Belegungen gar nicht mehr diesem Namen entsprechend wirken.

6. Wirkungen des elektrischen Ausgleichs.

Dass mit dem Fortschritt auf dem Gebiet der Erzeugungsapparate und Sammelapparate auch solche in der Beobachtung der Erscheinungen beim elektrischen Ausgleich Hand in Hand gingen, war zu erwarten. Hiervon seien erwähnt die Wärmewirkungen der Funkenentladung durch die Luft mittels eines Luftthermometers von KINNERSLEY (1761), sowie die zerstäubende Entladungseinwirkung auf feste Leiter, welche auf rasch vorübergehender, aber sehr bedeutender Wärmesteigerung beruht und anfangs vielfach falsch gedeutet wurde. Die Beobachtung der auf elektrischen Isolatoren (Harzkuchen) entstehenden LICHTENBERGschen Staubfiguren nach vorausgegangener Funkenentladung führten zur Untersuchung der elektrischen Natur pulverförmiger Körper. Erst durch FARADAYS (Exp. Res. XVIII) Untersuchungen wurden aber zahlreiche Unsicherheiten und Abweichungen in diesen Anordnungserscheinungen des „elektrischen Pulvers“ erklärlich und der grosse Einfluss von anderen Faktoren, wie Beschaffenheit von Pulverbeutel und durchfallener Luftsäule, erkannt. Die Einwirkung auf Nichtleiter, welche in den Entladungsweg eingeschaltet waren, wurde gleichfalls untersucht. MARUM beobachtete die den Blitzwirkungen ähnlichen mechanischen Zerreissungen an einem etwa 10 cm hohen Cylinder von Buchsbaumholz und versuchte auch die dazu erforderliche mechanische Kraft angenähert zu berechnen; ebenso die gegenwärtig durch den oscillatorischen Charakter der Entladung zu erklärende Erscheinung, dass bei einem durchschlagenen Buch der Lochrand auf beiden Seiten nach aussen gerissen war, was aber damals von SYMMER als Stütze seiner Theorie benutzt wurde. Gegen FRANKLIN und für SYMMER deutete man das von WILKE beobachtete Auftreten des elektrischen Windes bei negativer Spitzenladung ebenso wie das Auftreten des negativen Glimmlichtes an letzteren; während man heute beides unabhängig von der Fluidumszahl, nämlich durch Konvektion erklärt. Die mitunter bis zum

Schmelzen gesteigerte Erwärmung bei der Entladung durch Metalldrähte wurde durch Kinnersley, Franklin und Pristley näher untersucht.

Auch finden sich hier bereits technisch interessante Ansätze in Gestalt der allerdings nicht ganz gelungenen Versuche Gesetze über die zum Schmelzen erforderliche Energie aufzustellen oder doch wenigstens die Schmelzbarkeit bei verschiedenen Metallen zu vergleichen (vgl. Hoppe, § 73). Neben diesen rein physikalischen Ausgleichwirkungen treten auch die Untersuchungen der elektrochemischen Wirkungen immer mehr in den Vordergrund. Durch die Entdeckung des Sauerstoffes, welche in jener Zeit (1774) von Pristley gemacht, aber erst durch Lavoisier in den achtziger Jahren zur allgemeinen Anerkennung gebracht wurde, gewinnen jene noch besonders an Bedeutung. Interesse bietet hier namentlich die von Marum (vgl. 5) beim Ausgleich grösserer Energiemengen an gespannter Elektrizität durch Eisendraht beobachtete Zerstäubungs- und Oxydationserscheinung, welche er unter Zuhülfenahme des Sauerstoffes bemerkenswert richtig erklärt, wenn auch entsprechend der damaligen Bezeichnungsweise Oxydation mit Verkalkung bezeichnet. Die andererseits bei der Entladung durch Metalloxyde auftretende „Revivifikation" (Reduktion) der Metalle wurde bei Zink und Quecksilber bereits früher von Beccaria entdeckt, wodurch gleichsam der Keim zu der heute so bedeutenden elektrochemischen Industrie gegeben war. Die chemische Beeinflussung eines abgeschlossenen Luftvolums durch hindurchgehende Funkenentladung wurde von Pristley im Jahr 1785 beobachtet und fälschlich als Kohlensäurebildung angesprochen, 1788 von Cavendish richtig als Bildung von Salpetersäureanhydrid ($N_2\,O_5$) nachgewiesen.

Der erste einwurfsfreie Nachweis der Zerlegung des Wassers in „brennbare Luft" (Wasserstoff) und „Lebensluft" (Sauerstoff) beim Durchgang der elektrischen Entladung, sowie die Wiedervereinigung jener beiden Bestandteile beim durchschlagenden elektrischen Funken dürfte 1789 von Paets, von Troostwijk und Deimann gegeben worden sein (vgl. Ostwald, Kap. I, § 5). Die Untersuchung der physiologischen Wirkungen des Entladungsschlages — Tötung eines Sperlings durch Nollet (1746), verschiedener anderer Tiere durch Gralath, — wurde bald auch auf Menschen ausgedehnt und artete neben einigen zuverlässigen, einigen mutmasslichen Erfolgen vielfach in einen elektromedizinischen Wunderschwindel aus, der nach Entdeckung des Galvanismus sich eher noch steigerte und ja bis auf den heutigen Tag noch nicht verschwunden ist, dank den schwierigen und unklaren Verhältnissen auf diesem Gebiet.

7. Die ersten elektrischen Messinstrumente.

Es liegt in den Verhältnissen der mit hohen Spannungen arbeitenden Reibungselektrizität begründet, dass die Ausbildung ihrer Messtechnik auf grosse Schwierigkeiten stossen musste, ebenso dass von den benutzbaren Ausgleichwirkungen sich fast nur die ponderomotorischen zu Messzwecken eignen konnten. Immerhin sind die Fortschritte auf diesem Gebiet durchaus bemerkenswert und verdienen namentlich in den mustergiltigen diese Periode abschliessenden Arbeiten von Coulomb noch heute unsere Bewunderung. Wiederum waren es zunächst die Untersuchungen der Luftelektrizität, welche eine weitere Verbesserung der ersten elektrischen Messinstrumente, der Elektroskope, anregten.

Als erste elektrometerartige Ausbildung derselben (1752) wäre wohl das mit einem Quadranten versehene „elektrische Gnomon" des Petersburger Physikers Richmann (vgl. Ostwald, Kap. IV, § 1) zu erwähnen, der 1753 bei

Versuchen mit demselben durch einen aus der Auffangstange auf ihn überspringenden Blitz seinen Tod fand. Weitere Verbesserungen brachten das noch heute benutzte Hollundermarkelektroskop von CANTON (nach anderen CAVALLO 1753, vgl. OSTWALD, Kap. IV § 2), sowie das gleichfalls für sehr hoch gespannte Elektrizität verwendete Quadrantenelektroskop von HENLEY (1772); ferner das in Verbindung mit dem oben (**5**) erwähnten Kondensator auch für kleinere Spannungen benutzbare Strohhalmelektroskop von VOLTA (1781), sowie namentlich die Ausbildung des allgemein bekannten Goldblattelektroskops durch den Engländer BENNET (1787). Im Prinzip ähnlich dem wegen Hygroskopie oft gestörten Strohhalmelektroskop werden hier zwei schmale sehr leichte Streifen aus gut leitendem Metall (Goldblatt) auf denselben Spannungszustand gegenüber der Umgebung gebracht, sei es durch direkte Berührung der mit den Streifen leitend verbundenen metallischen Zuführung, sei es durch Influenz bei Benutzung des Kondensators. Die ponderomotorische Wirkung zwischen beweglichen geladenen Körpern in Richtung einer Kapazitätsvergrösserung des beweglichen Systems — nämlich Abstossung zwischen gleich, Anziehung zwischen verschieden elektrischen Körpern — giebt in dem eventuell durch Gradteilung gemessenen Ausschlag ein, wenn auch noch rohes Messmittel für den Grad der Spannungsdifferenz. Diese Messinstrumente können als Vorläufer der in der heutigen Wechselstromtechnik verwendeten elektrostatischen Spannungsmesser gelten. Für mehr qualitative und für Demonstrationszwecke ist das BENNETsche Elektroskop, oder eine Modifikation desselben übrigens noch heute von Wichtigkeit (vgl. **40**). BENNET war es auch, der zuerst die Wichtigkeit der Leitungsfähigkeit einer Flamme für die Untersuchung der Luftelektrizität in einer bestimmten Luftschicht erkannte (1786), und genauere Untersuchungen mit dieser den gewöhnlichen starren Metallspitzen weit überlegenen Flammenspitze ausführte. Das beste Mittel eine elektrische Ladung zu entfernen: das Bestreichen der Oberfläche des elektrisierten Körpers mit einer Flamme, wurde zuerst von VOLTA angegeben, der unabhängig von BENNET und wenig später ihre Spitzenwirkung erkannte (vgl. HOPPE, § 64). Als Vorläufer unserer heutigen Registrierapparate verdient vielleicht noch der selbstthätige Registrierapparat für Luftelektrizität des geistreichen LICHTENBERG Erwähnung. Die Erkennung der jeweiligen Luftelektrizität wird durch die früher (**6**) erwähnten, nachträglich hervorgerufenen Staubfiguren auf einer elektrisierten Schellackfläche ermöglicht; letztere rotiert, von einem Uhrwerk angetrieben, unter einer Messingkugel fort, welche dauernd in leitender Verbindung mit der Untersuchungsspitze steht. Die Bestäubung der Berührungslinie zwischen Kugel und Schellack macht den Wechsel der Luftelektrizität abhängig von der Zeit erkennbar.

Einen weiteren Fortschritt in Richtung der quantitativen, d. h. messenden Untersuchung elektrischer Erscheinungen stellt die Ausbildung der KLEISTschen Flasche durch den Engländer LANE zu der nach ihm benannten Massflasche dar. Die allerdings nur beim Verschwinden, d. h. beim Ausgleich der Ladungen mögliche Messung der Elektrizitätsmenge Q erfolgte hierbei durch die konstante Kapazität C der Massflasche in Verbindung mit der bestimmten Entfernung der Entladungsstrecke. Letztere entspricht nämlich einer als angenähert konstant anzusehenden Grenzspannung E zwischen den Flaschenbelegungen nach der früher (**6**) erwähnten Gleichung $Q = E \cdot C$. Die Verfeinerung dieser Messung durch Messung jener Entfernung mittels Mikrometerschraube wahrscheinlich die erste messtechnische

Anwendung einer solchen (vgl. HOPPE § 66) — erfolgte durch SIGAUD DE LA FOND (1781).

Besondere Erwähnung verdienen die mit Hülfe sehr einfacher Messmittel (Markkugelelektrometer und einem durch Verschiebung einer Belegung variabel gemachten Kondensator) von CAVENDISH (1773) durchgeführten Vergleichungen von Kapazitäten, sowie die ersten experimentellen Bestimmungen von Dielektrizitätskonstanten. Die durch eine Art Null- oder Kompensationsmethode (vgl. Wd. I, 152) aus den Dimensionen des variablen Kondensators ermittelten Werte beweisen ein verhältnismässig erstaunliches Messgeschick bei CAVENDISH, wenn seine Ergebnisse auch unter dem überwältigenden Einfluss von COULOMBS Arbeiten in Vergessenheit gerieten und erst (1879) durch MAXWELL wieder ausgegraben und gewürdigt wurden (vgl. **21**). Auch die Vorstellung über die die Kapazität vergrössernde Wirkung der dielektrischen Platten anstelle der Luft ist für heute sehr bemerkenswert; die etwa achtfach gefundene Vergrösserung der Ladung bei Ersatz der Luftschicht durch eine Glasplatte glaubte er durch einen Wechsel von leitenden und nichtleitenden Schichten im Glas entstanden, wobei die letzteren $^1/_8$ der Glasdicke einnehmen (vgl. **115**).

8. Coulombs Arbeiten.

Die sowohl messtechnisch als auch überhaupt wissenschaftlich hervorragendsten Leistungen der ganzen Periode bilden die Forschungsergebnisse COULOMBS. Er bildete zunächst (1784) seine zur Messung ausserordentlich kleiner Kräfte geeignete Torsionswage aus. Unabhängig von der bisher stets als Kraftmass benutzten Erdschwere benutzte er zur Messung die Torsionskraft sehr feiner Drähte oder Fäden, welche proportional mit dem Drehwinkel wächst. Hierauf führte er in den folgenden Jahren (1785—88) die für die Elektrostatik fundamentalen Untersuchungen über die ponderomotorischen Wirkungen elektrisch geladener Körper aus. Das Ergebnis war das auch für die heutige absolute Messtechnik noch den Ausgangspunkt bildende Grundgesetz zweier punktförmig auf einander wirkender elektrischer oder magnetischer Massen (vgl. **133**, sowie Band II) und zunächst im besondern das Gesetz der sogenannten „elektrostatischen Fernwirkung“: „die abstossende Kraft zweier kleiner, gleichartig elektrisierter Kugeln steht im umgekehrten Verhältnis zum Quadrat des Abstandes der Mittelpunkte der beiden Kugeln.“ Das Gesetz stimmte also der Form nach völlig mit dem NEWTONschen Gravitationsgesetz

$$f = c \cdot \frac{m' \cdot m''}{l^2},$$

wenn m' und m'' an Stelle der beiden gravitierenden Massen die beiden Elektrizitätsmengen mit der gegenseitigen Entfernung l bezeichnete und der von den Masseinheiten abhängige Massfaktor c berücksichtigt, oder durch die Wahl der letzteren gleich der Einheit gemacht wurde.

Nicht nur die Ausbildung der Torsionswage (vgl. Fig. 1), sondern auch die ganze Durchführung der Untersuchungen, sowie die Berücksichtigung aller möglichen Fehlerquellen ist als geradezu mustergültig anzusehen. Als Nebenergebnisse wären hierbei die — in ihrer Richtigkeit heute allerdings angezweifelten (vgl. **37**) — Beobachtungen über Zerstreuung, d. h. Elektrizitätsverlust eines elektrisch geladenen Körpers an die umgebende Luft, abhängig von der Luftfeuchtigkeit zu nennen, sowie vergleichende Untersuchungen über die Isolationsfähigkeit verschiedener Stoffe, endlich die von ihm auch mathematisch behandelte Verteilung der Elektrizität auf der Ober-

fläche elektrisch geladener Körper, sowie die Anordnung der Elektrizität, d. h. das Auftreten eines elektrischen Spannungszustandes allein an der Oberfläche (nach unseren gegenwärtigen Vorstellungen einer Grenzfläche bei dielektrischer Verschiebung).

Wenn man vom technischen Standpunkte aus von einer Schattenseite dieser vortrefflichen Leistungen zu sprechen hat, so liegt dieselbe bei der weiteren Entwickelung in der ausserordentlich starken Beeinflussung der Auffassung nicht nur elektrostatischer, sondern auch magnetischer Erscheinungen. Nicht Coulomb, aber seine Nachfolger sind von dem Vorwurf einer zu einseitigen Auffassung der Erscheinungen, namentlich der magnetischen, nicht freizusprechen. Zu Gunsten bequemer mathematischer Angriffspunkte wurde die abstrakte Vorstellung der punktförmigen Pole und des nach Art eines Fluidums behandelten freien Magnetismus länger als wünschenswert aufrecht erhalten, wobei der Fehler nicht in irgend einer Unrichtigkeit der Beobachtung oder Abstraktion Coulombs lag, vielmehr in der übertriebenen Betonung dieser e i n e n, etwas oberflächlichen Erscheinungsseite durch die nachfolgenden Physiker und in der ungesunden Zurückdämmung der Ausbildung anderer Gesichtspunkte. Solche wurden eigentlich bereits durch die soeben erwähnten Beobachtungen von Cavendish verlangt und später von Faraday und Maxwell zwar entwickelt, von ihren Zeitgenossen aber viel zu wenig beachtet. Erst die aufstrebende und durch jene mathematisch-physikalische Einseitigkeit beengte Elektrotechnik erzwang sich die Anerkennung der tieferen Auffassung unter Beseitigung der Fernwirkungstheorie und wirkte so in den letzten Jahren heilsam auf die Physik zurück.

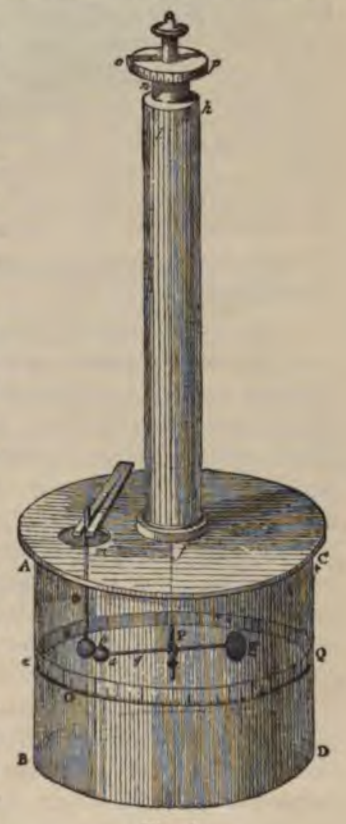


Fig. 1.

Betrachtet man die Verhältnisse der Elektrophysik nach Abschluss der Arbeiten von Coulomb (1788), so muss man anerkennen, dass fürs erste so ziemlich alles erreicht war, was bei Beschränkung auf Reibungselektrizität erreicht werden konnte. Wenn auch eine spätere Weiterentwickelung der reibungselektrischen Erscheinungen nach der Seite des dynamischen Ausgleichs, sowie des Elektromagnetismus nicht als völlig ausgeschlossen zu betrachten gewesen wäre, so ist sie doch als recht unwahrscheinlich anzusehen, und es bleibt auf alle Fälle ein bemerkenswertes Zusammentreffen, dass so unmittelbar nach dem Abbau der Reibungselektrizität ein völlig neues Gebiet in der zufälligen Entdeckung des Galvanismus erschlossen und dadurch der kräftigen Entwickelung der Elektrophysik die Stetigkeit gewahrt wurde.

9. Galvanis Entdeckung und Volta.

(1790—1820.) Die Entdeckung von Galvani (geb. 1737, gest. 1798) hat durch die schon früher bekannte elektrische Wirkung der sogenannten Krampffische eine gewisse Vorgeschichte. Die Empfindung beim Einschalten eines Körperteiles in den Entladungsweg der Leydener Flasche liess den elektrischen Charakter jener eigentümlichen, von den Krampffischen erteilten

Schläge vermuten, und von WALSH wurde die elektrische Natur des Zitterrochen (1773) unzweifelhaft nachgewiesen. Mit dieser „tierischen Elektrizität" hat sich auch GALVANI beschäftigt. Seine erwiesenermassen durch Zufall herbeigeführte Entdeckung der elektrischen Empfindlichkeit von Froschnerven im Jahre 1791 zerfällt eigentlich in zwei ganz getrennte Teile: das ist die zunächst beobachtete Nervenzuckung beim benachbarten Ausgleich elektrischer Ladungen, sowie die bei seinen fortgesetzten sorgfältigen Untersuchungen entdeckten Nervenzuckungen ohne Vorhandensein eines solchen. Die erste, eigentlich nichts wesentlich Neues darbietende Entdeckung ist, wie auch VOLTA bereits (1792) völlig klar erkannte (vgl. OSTWALD, Kap. III, § 2), auf zwei schon damals wohlbekannte Thatsachen zurückzuführen: „erstens, dass in Leitern der Elektrizität, welche sich in der Nähe von Konduktoren befinden, bei der Entladung der letzteren gleichfalls elektrische Bewegungen stattfinden, und zweitens, dass elektrische Bewegungen in lebenden oder frisch getöteten Muskeln Kontraktionen hervorrufen." Jene erste Thatsache würden wir heute dadurch erklären, dass der Froschnerv den Teil eines Leiterkreises bildet, in welchem durch Wechselinduktion ein Strom induziert wird, wenn die vom benachbarten Primärkreis ausgehende elektromagnetische Welle ihn durchsetzt (vgl. Hülfsvorstellungen, Fig. 13).

Die zweite durch diese angeregte Entdeckung aber, d. h. das Auftreten von Nervenzuckungen oder eines elektrischen Ausgleichs als Folge der Berührung zweier verschiedener Metalle, welche mit dem Froschnerv zusammen einen Leiterkreis bilden, enthält etwas fundamental Neues. GALVANI war durch seine sonstige Beschäftigung als Anatom und Physiolog allerdings an der richtigen Erkenntnis dieser fundamental neuen Thatsache verhindert. Auf „tierische Elektrizität" eingeschworen, war er von dem Wunsche beseelt weitsichtige biologische Probleme hiermit zu lösen. Er wollte auch bis zu seinem Tode von keiner anderen Deutung der Erscheinung als dieser wissen und verlor sich in phantastische und ganz unhaltbare Vorstellungen. Das wissenschaftliche Hauptverdienst fällt aus diesem Grunde dem Physiker VOLTA (geb. 1745 zu Como, gest. 1827 zu Padua) zu, welcher anfangs mit GALVANI in der „tierischen Elektrizität" übereinstimmend, den Froschmuskel als Leydener Flasche auffasste. Bei seiner folgerichtigen und wissenschaftlicheren Denkweise wandte er sich immer mehr der Erklärung der nächstliegenden Thatsachen zu und deckte dadurch mit staunenswerter Sicherheit den Zusammenhang der physikalischen Grundlagen dieses Erscheinungsgebietes auf. Infolge seiner geistigen Überlegenheit hat er für die ersten Jahre die Fortschritte der Entwickelung dieses neuen Zweiges der Elektrizitätswissenschaft nahezu monopolisiert, so dass er dieser ganzen Periode seinen geistigen Stempel aufdrückt. Bereits in seinem Brief an CAVALLO vom 25. Oktober 1792 (der „Royal Society" im Januar 1793 vorgelegt, in den Philos. Trans. 1793 I, S. 10–44 veröffentlicht), bezeichnet er den Froschnerv nur als ein ungemein empfindliches „animalisches Elektrometer" und formulierte die Ergebnisse seiner Untersuchungen wie folgt (vgl. OSTWALD, Kap. III, 2):

Auf diese Weise habe ich ein neues Gesetz entdeckt, welches nicht sowohl ein Gesetz der tierischen Elektrizität, sondern eines der gewöhnlichen ist, welcher man die meisten der Erscheinungen zuschreiben muss, die nach den Versuchen von GALVANI und denen, die ich im Anschluss an diese selbst angestellt habe, durch eine wahre spontane tierische Elektrizität hervorgerufen schienen, was sie doch nicht sind; thatsächlich sind

es die Wirkungen einer sehr schwachen künstlichen Elektrizität, welche in einer Weise erregt wird, die man nicht erwartet hatte, nämlich einfach durch die Anbringung zweier Ableitungen von verschiedenen Metallen, wie ich das schon angedeutet habe und weiterhin besser darlegen will.

Bei weiterer Verfolgung findet er (1794) „als wahre Beweger und Erreger der Elektrizität" die Berührung zweier verschiedener Metalle, oder bei nur einem Metall diejenige von ungleichen Zuständen der Metallenden bezüglich Wärme, Härte oder Zusammensetzung. In diesem Jahre giebt er bereits die erste Spannungsreihe, die im wesentlichen bemerkenswert richtig ist, und weist 1795 die völlige Unabhängigkeit der elektrischen Erscheinung von der Einschaltung einer Nervenstrecke nach. Alle Einwendungen der zahlreichen Gegner, worunter namentlich A. von Humboldt als eifriger Anhänger der „tierischen Elektrizität", weiss er zu entkräften, bis es ihm mit dem Schluss des Jahrhunderts gelingt, die von ihm vertretene Auffassung durch die Erfindung der nach ihm benannten „Säule" zu krönen und ihr hierdurch zu allgemeiner Anerkennung zu verhelfen. Nach diesen einleitenden Bemerkungen zur Geschichte des Galvanismus seien die Ergebnisse dieser Periode wieder nach den schon vorher genannten Gesichtspunkten zusammengefasst.

10. Die elektrischen Stromquellen.

Was die Erzeugung des elektrischen Spannungszustandes anlangt, so hatte Volta (1794) die Berührung verschiedener Metalle als die Ursache der Elektrizitätserregung angegeben. Von Einzelnen wurde nun nicht nur dies als Ursache bekämpft, sondern sogar der elektrische Charakter der dabei auftretenden Erscheinungen bestritten, wie z. B. von Fabbroni, welcher die bei der Berührung der Metalle auftretenden Erscheinungen als rein chemische betrachtet; oder von dem Arzt Crève in Mainz, welcher ein eigenes noch unbekanntes Fluidum als Ursache annahm. Es war daher wichtig, diese galvanische Elektrizitätserregung zunächst mit der Reibungselektrizität nach den verschiedensten Seiten in Beziehung zu setzen und die Identität des „galvanischen Fluidums" mit dem elektrischen nachzuweisen. Dies umsomehr, als thatsächlich eine sehr erhebliche Verschiedenheit in der Grössenordnung der Spannungserzeugung bei den damaligen reibungselektrischen und galvanischen Versuchen vorlag. Hierdurch wurde anfangs der elektrometrische Spannungsnachweis bei galvanischer Erregung sehr erschwert und konnte durch Volta nur mit Hülfe des Kondensators ausgeführt werden, wodurch das Überzeugende für viele beeinträchtigt wurde, namentlich bei der Kleinheit der auch hiermit erzielten Ausschläge. Dieser Umstand trug viel zu seinen Versuchen bei, die schliesslich (1799) zur folgereichen Entdeckung seiner „Säule" führten. Die zunächst erkannte Verschiedenheit der Berührungsspannung zwischen Metallen unter sich und Elektrolyten drückt sich durch folgende charakteristische Stelle eines Briefes an Gren (1796) aus (vgl. Ostwald, Kap. III, 4):

Die Berührung verschiedener Leiter nämlich, besonders metallischer, der Kiese und anderer Erze und die Holzkohle mit inbegriffen, die ich alle trockene Leiter oder von der ersten Klasse nenne; die Berührung dieser Leiter, sage ich, mit anderen feuchten Leitern oder mit Leitern der zweiten Klasse, erschüttert und trübt das elektrische Fluidum und giebt ihm einen gewissen Antrieb. Fragen Sie mich noch nicht nach dem Wie: es ist genug, dass dies eine Thatsache ist und eine allgemeine Thatsache. Um also bei Fröschen Kontraktionen, auf der Zunge Geschmack, in den Augen die Empfindung des Lichtes u. s. w. zu erregen, ist es schlechterdings notwendig, dass sich zwei verschiedene Metalle oder Leiter der ersten Klasse auf einer Seite berühren oder einen heterogenen zusammengesetzten Metallbogen bilden, während sie mit ihren gegenüber-

stehenden Enden den oder die Leiter der zweiten Klasse berühren und zwischen sich fassen, die den anderen Bogen bilden.

Nachdem Volta so das „Element“ zur Spannungserzeugung erkannt hatte, führte die ihm geläufige Zusammenschaltung von Leydener Flaschen zu „Batterien“ zur Kombination der einzelnen (parallelgeschalteten) Elemente und so endlich zur Entdeckung der „Serienschaltung“ der Elemente, d. h. Spannungssummierung in der Voltasäule und den gleichzeitig angegebenen ersten Primärelementen in Gestalt der Tassenkette oder -krone (couronne de tasse). An letzterer wurde von ihm die algebraische Summation der Einzelspannungen bei Serienschaltung nach Art positiver und negativer Einheiten nachgewiesen, d. h. die Zusammensetzung der resultierenden Spannung aus elektromotorischen Kräften und Gegenkräften (vgl. seinen Bericht an den Präsidenten der Londoner Royal Society vom 20. März 1800, abgedruckt in Ostwald, Kap. VI, 2). Erwähnt sei, dass er die Säule in jenem Bericht als „elektromotorisches Instrument“ bezeichnet und in dem gleichsam sein abschliessendes elektrisches Glaubensbekenntnis enthaltenden Vortrag am 21. November 1801 vor der Pariser Akademie kurzweg als „Elektromotor“. Der letztere vor dem Konsul Napoleon I. gehaltene und mit einer eigenen goldenen Medaille ausgezeichnete Vortrag verdankt seine Berühmheit in der Geschichte der Physik namentlich dem darin ausgesprochenen und auch zahlenmässig belegten Spannungsgesetz, wonach erstens: zwei Metalle, zwischen welchen eine ganze Reihe anderer in beliebiger Ordnung liegt, sich stets so verhalten, als ob sie sich direkt berührten, und zweitens: ein Kreis, nur aus Metallen bestehend, keine elektrische Strömung zu Wege bringen kann. Ferner wird dargethan, dass dieses Spannungsgesetz nicht für Flüssigkeiten in Berührung mit Metallen gilt und daraus die resultierende elektrische „Spannung“ abgeleitet. Der letztere Ausdruck findet sich bei dieser Gelegenheit zum erstenmal verwendet (vgl. Hoppe, § 99). Als Einheitsmass der Spannung, welche von Volta mit Hülfe des Kondensators am Elektroskop ermittelt wurde, diente diejenige zwischen Silber und Kupfer, wonach sich diejenige zwischen Silber und Zink gleich 12 ergab.

Die allerorten sogleich aufgenommenen Versuche mit Voltas Säule führten zu einigen weiteren Entdeckungen und Verbesserungen. Nicholson verglich (1800) auf Grund der physiologischen Wirkung (Stärke des empfundenen Schlages) die Säule mit einer bestimmten Leydener Flasche und fand etwa Gleichheit, wenn die durch Ladungsteilung am Bennet-Elektrometer ermittelte Spannung der letzteren 7500 mal grösser war als die der Säule. Im gleichen Jahr (1800) wurde noch die Notwendigkeit des Sauerstoffes für die Wirksamkeit der Säule durch Holdane nachgewiesen, ebenso die Verbesserung der Säulenwirkung bei Ersatz des Wassers als feuchten Zwischenleiters durch Salmiak von Cruikshank. Ritter ersetzte (1801) Silber durch das jetzt gebräuchliche Kupfer, während von Arnim im gleichen Jahr die doppelten Endplatten an der Voltasäule als unnötig nachwies, weil zur Spannungssteigerung nichts beitragend. Die dadurch strittig gewordene Polbezeichnung wurde durch Ritter in dem noch heute geltenden Sinn entschieden, dass der Pol nach dem vom Elektrometer angezeigten Spannungszustand bezeichnet wird, welchen das nicht in der Flüssigkeit befindliche Elektrodenende anzeigt. Eine Ausgestaltung des Einzelelementes in Richtung grösserer Leistungsfähigkeit, d. h. Stromstärke bei äusserem kleinen Widerstand wurde rein empirisch in dem Übergang zur grossplattigen „Kette“

bezw. zur Parallelschaltung vieler kleinerer Platten gefunden. Ein solcher (1819) von HARE hergestellter Apparat wurde wegen seiner grossen Wärmewirkung in dem äusseren Schliessungsdraht vielfach unter dem Namen „Kalorimotor“ verwendet.

Die erste Beobachtung einer Polarisationsspannung und damit der Ansatz zu den heute wichtigen Sekundärelementen rührt von dem Franzosen GAUTHEROT (1802) her. Weiter verfolgt wurde diese Erscheinung von RITTER, der bei wechselnder Spannung ein Polarisationsmaximum beobachtete. RITTER stellte 1803 eine Sekundärbatterie aus 50 Kupferscheiben mit feuchten Zwischenlagen her und führte mit ihr nach Ladung so ziemlich alle Versuche wie mit der Voltasäule selbst aus. Die auch bei anderen Metallen, namentlich Platin, beobachteten Ladeerscheinungen wurden von BRUGNATELLI (1806) auf die durch Wasserstoffaufnahme der Metalle bedingte Änderung ihrer Stellung in der „Spannungsreihe“ zurückgeführt. Eine Vervollständigung der Reihe von VOLTA war bereits 1804 durch RITTER erfolgt, wobei namentlich der durch BRUGNATELLIS Erklärung angeregte Nachweis bedeutungsvoll ist, dass die Legierungen von Metallen häufig eine nicht zwischen den Metallen befindliche Stellung einnehmen.

Die erste Beobachtung der in sogenannten Konzentrationsketten auftretenden elektrischen Spannung wurde durch ihre Stromwirkung zufällig von BUCHHOLZ (1804) gemacht und durch Zurückführung auf ein galvanisches Element, bestehend aus z w e i Flüssigkeiten von verschiedener Konzentration und e i n e m Metall durch RITTER (1805) erklärt (vgl. OSTWALD, Kap. VII, 11).

Auch die erste thermoelektrische Erscheinung, d. h. die Spannungserregung durch verschiedene Erwärmung einer Kombination von Leitern, ja sogar in Form einer Art Thermosäule, d. h. bei Hintereinanderschaltung mehrerer Elemente, wurde durch SCHWEIGGER schon im Jahre 1810 beobachtet, der hervorgerufene Galvanismus auch richtig auf die durch Flammen erzeugte Temperaturerhöhung zurückgeführt, jedoch die Angelegenheit sonderbarerweise weder von ihm noch anderen weiter verfolgt (vgl. OSTWALD, Kap. X, 5).

Für die Spannungserzeugung bemerkenswert ist noch die von RITTER (1803) gemachte Beobachtung, dass auch unter Ersetzung der feuchten Zwischenleiter durch scheinbar ganz trockene (Schafleder) die Säule die gleiche Spannung besitzt wie die VOLTAsche, dass hingegen alle mit einer solchen ausgeführten Ladungen sehr viel längere Zeit brauchen. Diese sogenannte trockene Säule, welche in den Folgejahren eine unverdient grosse Rolle im wissenschaftlichen Interesse spielte (vgl. OSTWALD, Kap. IX, 2), wurde verschiedene Male von neuem entdeckt, so von BEHRENS (1804), MARÉCHAUX (1805). Sie wurde 1810 von DE LUC trotz ERMANS Nachweis (vgl. **14**) wiederum erfunden, aber erst nach ihrer nochmaligen Erfindung von ZAMBONI in Verona (1812) mit ihrem Aufbau aus Gold- und Silberpapierscheiben allgemein bekannt.

11. Untersuchungen an Voltas Säule.

Verglichen mit der Reibungselektrizität traten die elektrostatischen und speziell die elektroskopischen Spannungserscheinungen des Galvanismus völlig zurück. Dies macht es erklärlich, dass von GALVANI selbst neben einer Reihe übereinstimmender Eigenschaften der „tierischen“ und Reibungselektrizität als Hauptunterschied beim Galvanismus das Fehlen einer „elektrischen Atmosphäre“ aufgeführt wurde, also die dielektrische Verschiebung und Influenz, sowie damit im Zusammenhang die Anziehung und Abstossung.

Nach Erfindung der Säule wurde die Aussicht auf den Nachweis auch dieser Erscheinungen günstiger. Experimentell bestätigt wurden dieselben durch PFAFF und RITTER (vgl. HOPPE § 96). Andererseits ist es aber gerade auch RITTER, welcher auf einzelne auffallende Unterschiede beim dynamischen Ausgleich von Reibungselektrizität und galvanischer Elektrizität hinwies und mit Recht vor zu weitgehender Identifizierung beider warnte. Von diesen dynamischen Ausgleicherscheinungen wurde namentlich die sogleich nach dem Bekanntwerden der VOLTAschen Säule von CARLISLE und NICHOLSON (1800) und wahrscheinlich unabhängig von ihnen durch RITTER (vgl. HOPPE § 95) beobachtete Wasserzersetzung mit getrennter Ausscheidung von Wasserstoff und Sauerstoff von grosser Bedeutung für die Auffassung der galvanischen Erscheinungen vom elektrochemischen Standpunkt (vgl. **12**). So erregte die Thatsache, dass der Ausgleich von Reibungselektrizität mit einer dem Schlage nach etwa tausendmal stärkeren Spannung als die der Säule keine merkliche Wasserzersetzung vermöge, dass grösste Erstaunen. Ebenso der Umstand des räumlich völlig getrennten Auftretens von Sauerstoff und Wasserstoff bei der Zersetzung durch die Säule. Beides erscheint uns heute nach Kenntnis des FARADAYschen Gesetzes, sowie des vielfach oscillatorischen Charakters von Kondensatorentladungen durchaus erklärlich.

VOLTA hatte den wesentlichen Unterschied seiner Säule gegenüber einem mit Reibungselektrizität geladenen Konduktor zwar auch in der fortwährenden Aktionsfähigkeit, oder, wie wir heute sagen würden, der Konstant- bezw. Aufrechterhaltung der Spannung erkannt; auch verglich er dieselbe richtig mit einer unerschöpflichen, schwach geladenen Kapazität, verknüpfte aber die für uns unhaltbare Vorstellung eines elektrischen Perpetuum mobile mit der Säule. Erklärt sich das letztere auch durch seine Unkenntnis des Energieprinzipes, sowie durch seine einseitige Auffassung der Elektrizitätserregung durch Berührung, so hat er doch allem Anschein nach den für seine einmal gefassten Ansichten wenig passenden elektrochemischen Zersetzungserscheinungen absichtlich nicht näher treten wollen (vgl. OSTWALD, Kap. VI, § 7). Er selbst beschränkte sich daher auch auf die Untersuchung der mit der Säule erzielten Ausgleichwirkungen in elektroskopischer und namentlich in physiologischer Richtung, d. h. der Empfindungen bei Benutzung eigener Körperteile als Leiterstrecken unter Vergleichung der Säule mit dem Apparat elektrischer Fische. Daher stammt sein Vorschlag zur Bezeichnung der Säule als „organe électrique artificiel“ (HOPPE § 94).

Die elektrischen Ausgleichwirkungen wurden überall unter Benutzung der Säule studiert, auch in physikalisch-chemischer Richtung. Hierbei beobachtete VOLTA den in Luftstrecken auftretenden Ausgleichfunken bei Benutzung des Kondensators (1800), NICHOLSON denselben im gleichen Jahre direkt von der Säule, und RITTER fand bereits 1801 den Unterschied zwischen Öffnungs- und Schliessungsfunken auf. Eine als Trogbatterie bekannte Abänderung der „Kette“ durch CRUIKSHANK, welche eine Verkleinerung des inneren Widerstandes herbeiführte, zeigte eine Verstärkung der Ausgleichwirkung mit auch bei Tage sichtbaren Ausgleichfunken. Ferner beobachtete BOECKMANN die mit Rücksicht auf unsere heutigen Kenntnisse interessante Thatsache, dass die Stärke der Entladungsfunken der Oxydation der Zinkplatten, d. h. der Umsetzung im Element proportional sei, sowie dass die Länge der den äusseren Kreis schliessenden Leitung die Stärke der Schläge beeinflusse. Der getreueste Anhänger VOLTAs, der Physiker PFAFF,

führte mit einer Batterie von 200 Elementen nicht nur eine bestätigende Nachprüfung über die Spannungsverteilung an der Säule aus, sondern bewerkstelligte mit ihr auch zum Beweis der Gleichheit der reibungselektrischen und galvanischen Ausgleicherscheinungen die Erhitzung und Schmelzung von Metalldrähten. Auch wurde von ihm 1801 die erst durch das OHMsche Gesetz aufgeklärte Thatsache beobachtet, dass die Vergrösserung der Plattenoberfläche die Wirkung der Säule verstärke, und zwar nicht infolge veränderter Spannung oder Polarität, sondern durch „Abänderung der Geschwindigkeit des elektrischen Stromes.“ Auf Grund dieser und eigener Beobachtungen sprach RITTER bereits 1805 den von den anderen mit Unrecht angezweifelten Satz aus: dass „der Effekt der Säule bei gleicher Spannung abhänge von der Summe der Leitung in der Säule und dem schliessenden Bogen“. Im Anschluss hieran wäre sogleich zu bemerken, dass OERSTEDT, der 1816 eine verbesserte Form des Becherapparates erfand, hiermit die Wärmeerscheinungen des elektrischen Stromes untersuchte und fand, dass der Funke nur ein spezieller Fall, gleichsam ein Grenzfall des allgemeinen Gesetzes der Erwärmung durch den Strom ist, und dass die Erwärmung direkt proportional dem Widerstande sei, welchen die Drähte dem Strom entgegensetzen.

Bei der durchaus nicht leicht erkämpften Anerkennung der Wesensgleichheit von Reibungselektrizität und Galvanismus spielte der Nachweis des Berliner Physikers ERMAN (1802) eine wichtigere Rolle, dass die von A. v. HUMBOLDT als w e s e n t l i c h hingestellte Verschiedenheit beider gegenüber sehr schlechten Leitern, wie Flammen, trockenen Knochen, luftleerem Raum, nur quantitativer Natur ist. ERMANs sonstige Verdienste sind namentlich kritischer Natur gegenüber der damals besonders viel Unheil anrichtenden Naturphilosophie. Durch OHMs Untersuchung und Widerstandsformulierung ist das von ERMAN aufgestellte System der „unipolaren“ Leitung, d. h. verschiedener Leitungsfähigkeit gewisser Stoffe wie Seife, ferner von Flammen u. s. w. je nach der Richtung des Stromes später allerdings zu Falle gekommen; dass er gerade hierfür mit dem von Napoleon gestifteten kleinen galvanischen Preis ausgezeichnet wurde, sei nur des historischen Interesses halber erwähnt. (Eine in mancher Hinsicht lehrreiche Sammlung von „galvanischen Phantasieen“, die auf der wissenschaftlichen Tagesordnung standen, finden sich in OSTWALD, Kap. VIII, zusammengestellt). Die für die Ausgleicherscheinung wichtige Beobachtung, dass die Dichtigkeit der Elektrizität (Spannung) von den Polen an längs der Ausgleichleitung abnehme, wurde von ERMAN mit Hülfe zweier Elektroskope und einer feuchten Hanfschnur als Leitung nachgewiesen. Dass die Stärke des Stromes an allen Stellen des Kreislaufes gleich war, ergab sich aus der g l e i c h e n chemischen Wirkung in der Zersetzungszelle unabhängig von der Stelle der Einschaltung. ERMAN trug auch durch Untersuchung der übrigen physikalischen Ausgleicherscheinungen zur Klärung der Vorstellung bei und kann in mancher Beziehung als Vorarbeiter OHMs gelten, da er Spannungsverhältnisse im Stromkreis und Ausgleichintensitäten bei Variation der äusseren Leitungsverhältnisse studierte (vgl. OSTWALD, Kap. IX, 3).

12. Ausgleichwirkungen der Säule.

Erst durch die Steigerung der angewandten Spannung, wie sie die Säule ermöglichte, war nach PFAFF die sogenannte Periode des „einfachen“ Galvanismus überwunden, und es konnten die meisten elektrolytischen Untersuchungen vorgenommen werden. Die mit VOLTAs Säule von vielen, namentlich englischen Forschern ausgeführten elektrochemischen Untersuchungen, d. h. der Ausgleicherscheinungen bei Einschaltung von Elektrolyten (Leitern zweiter

Klasse) erwiesen sich gleichfalls als sehr erfolgreich. Auf der einen Seite gaben sie die Anregungen zu dem alsbald entbrennenden Kampfe um die Theorie des Galvanismus (vgl. **14**), auf der anderen bildeten sie die Anfänge der heutigen technischen Verwendung des elektrischen Stromes in der elektrochemischen Industrie.

Durch äusserst sorgfältige Untersuchungen, welche das Vorbild zu dem späteren Wassergewicht-Voltameter gaben, wies der Berliner Physiker Simon (1802) die bisher bezweifelte Gewichtslosigkeit des elektrischen Fluidums nach; er fand auch die Gewichte der bisher getrennt gesammelten Gase sehr nahe in Übereinstimmung mit dem von Lavoisier auf chemischem Wege gefundenen Verhältnis. Dass nach seiner Untersuchung ferner die gemischten Gase völlig reines Wasser ohne Beimischung ergaben, trug zur Klärung der noch immer umstrittenen Frage der Wasserzusammensetzung bei. Die endgiltige Erledigung der „grossen Wasserfrage“ erfolgte durch Versuche des sogleich zu erwähnenden Davy. Die elektrolytische Ausscheidung von Metallen, speziell von Blei und Kupfer aus den Metallsalzlösungen wurde zuerst von Ritter und von Cruikshank (1800) beobachtet. Die weitaus wichtigsten elektrochemischen Ergebnisse dieser Periode lieferten aber in den Jahren 1806 und 1807 die Arbeiten von Humphry Davy, welche einerseits die Grundlagen der bereits von Wollaston angeregten elektrochemischen Theorie des Galvanismus in hohem Grade festigten, sowie zu der elektrolytischen Gewinnung der bisher noch unbekannten Alkalimetalle „Pottassium“ und „Sodium“ (Kalium und Natrium) aus ihren Erden (Oxyden) führten (vgl. Ostwald, Kap. VII, 12 u. 13).

13. Technische Ansätze.

Die bereits 1746 von Winkler und Le Monnier (vgl. **3**) beobachtete leichte Übertragbarkeit elektrischer Ausgleichwirkungen durch grosse Leiterstrecken hindurch hatte wohl schon frühzeitig den Gedanken einer elektrischen Zeichenübertragung auftauchen lassen, ohne jedoch wegen der zu schweren Isolierfähigkeit der hochgespannten Reibungselektrizität irgend welche brauchbare Gestaltung zu erlangen. Die ersten Versuche dieser Art rühren (1774) von Lesage und Lomond her (vgl. Hoppe § 402). Nachdem beim Galvanismus diese Schwierigkeit in Wegfall kam und nachdem durch zahlreiche Versuche, namentlich 1803 von Basse in Hameln (vgl. Ostwald, Kap. IX, 4) nachgewiesen war, dass die mit der Voltasäule hervorgerufenen Ausgleicherscheinungen auch durch Einschaltung sehr langer Leiterstrecken, bis 4000 Fuss Draht, keine merkliche Schwächung erlitten — zahlreiche Versuche über Leitung durch Seen, Flüsse, Erdboden gelangen gleichfalls sehr gut — verstrich keine lange Zeit bis zur Ausbildung eines galvanischen Zeichenapparates. Unter Benutzung der bei Elektrolysierung von Wasser entstehenden Gasblasen erdachte und konstruierte der Mediziner Sömmering in Frankfurt a. M. die erste technisch verwendbare elektrische Zeichenübertragung (vgl. Bd. XII, 7, sowie nähere Beschreibung und Zeichnungen: Ostwald, Kap. IX, 5). Die infolge der gleichgrossen Anzahl von isolierten Leitungen und zu gebenden Zeichen noch etwas schwerfällige, in vielen Einzelheiten aber sehr sinnreiche Erfindung wurde zwar von Napoleon mit der Bemerkung: „c'est une idée germanique“ verworfen und gelangte auch nicht zur praktischen Verwendung; aber Anregungen für die spätere Telegraphie sind doch mehrfach darin enthalten. So findet sich hier z. B. zwecks Isolierung der Parallelleitungen zum ersten Mal die Anwendung der Seidenumspinnung. Die Vorzüge einer solchen elektrischen Telegraphie gegenüber der optischen wurden übrigens von Sömmering richtig angeführt, auch ein Kostenvoranschlag aufgestellt (vgl. Ostwald a. a. O.).

Erwähnenswert wäre noch die technische Verwendung der Wärmewirkung bezw. Funkenbildung des Stromes zur elektrischen Minenzündung, als deren Erfinder der Petersburger SCHILLING (1812) gilt.

Dass die elektrische Messtechnik in dieser Periode keine namhafte Förderung erfuhr, erklärt sich aus dem Umstand, dass die wesentliche Ausbildung der elektrostatischen Messapparate bereits bei Beginn vorläufig abgeschlossen war und elektromagnetische Instrumente noch nicht in Frage kommen konnten. Obwohl auch voltametrische Messgeräte vor Kenntnis des FARADAYschen Gesetzes eigentlich nicht zu erwarten sind, so begegnen wir doch einem Vorläufer in dem Galvanoskop, das von dem oben erwähnten SIMON vorgeschlagen wurde und das Messprinzip in den Hauptsachen richtig benutzte. Ob das von ROBERTSON konstruierte Instrument, welches bei Gelegenheit der Nachprüfung von VOLTAs Entdeckung von seiten einer Kommission der Academie Royal (vgl. **10**) entstanden sein soll, und in einer wassergefüllten Glasröhre mit einer Silberdraht- und einer Zinkdrahtelektrode bestand, praktisch verwendbar war, scheint sehr fraglich (vgl. OSTWALD IX, 6).

14. Auffassung der Erscheinungen des Galvanismus.

Die Auffassung der elektrischen Erscheinungen verdient gerade in dieser Periode eine besondere Erwähnung, weil sie auf die geschichtliche Entwickelung der Elektrophysik einen grossen Einfluss hatte. Der in ihr beginnende und sich durch das ganze Jahrhundert ziehende wissenschaftliche Kampf um die Theorie des Galvanismus bietet in mehr als einer Hinsicht Interessantes, wenn er auch stellenweise mit den weniger schönen Begleiterscheinungen des Streites auftrat und die Beteiligten in zwei grosse feindliche Lager spaltete. Die von GALVANI vertretene Ansicht über den tierischen Ursprung der von ihm entdeckten elektrischen Erscheinungen fand mit ihren für wissenschaftliche Irrwege besonders geeigneten phantastischen Folgerungen durch die besonnenen und klaren Untersuchungen VOLTAs eine für die Wissenschaftsentwickelung erfreulich rasche Beseitigung, wie bereits in **9** erwähnt. Die von VOLTA gefundene nächste Ursache der elektrischen Spannungserregung, die Vereinigung verschiedenartiger Leiter, erwies sich bald als richtig. Die Frage nach dem eigentlichen Sitz der elektromotorischen Kraft, oder besser der letzten Ursache der Spannungserregung war aber zunächst noch offen. VOLTA hielt sich hierbei als Physiker an das dem Augenschein nach Nächstliegende und betrachtete die Thatsache der Berührung oder des Kontaktes der verschiedenen Leiter als die durchgängige Ursache, alle anderen Erscheinungen, so auch die etwa auftretenden chemischen Prozesse nicht nur ausserhalb, sondern auch innerhalb der Säule, als die Wirkung des elektrischen Ausgleichs. Dieser letzteren Anschauung glaubten zunächst die mehr chemisch gebildeten Forscher entgegentreten zu müssen. Den Anfangspunkt dieser später als elektrochemische Theorie des Galvanismus bezeichneten Auffassung bildete vielleicht der von WOLLASTON 1801 zuerst gemachte Hinweis auf den engen Zusammenhang zwischen chemischem Vorgang und elektrischem Strom. Eine von CRUIKSHANK bereits 1801 ausgesprochene Auffassung bietet durch den Vergleich mit unserer heutigen Vorstellung Interesse. Er äussert die Vermutung, dass bei den elektrolytischen Prozessen die aus der einen Elektrode austretende Elektrizität die materiellen Moleküle „erfasse“ und weiter transportiere bis zur anderen Elektrode (vgl. OSTWALD, Kap. VII, 1). DAVY geht in seinen Schlüssen, die er auf Grund von (1801) gemachten Versuchen zieht, noch weiter, indem er ausspricht:

Von zwei Phänomenen oder zwei Reihen von Phänomenen können wir nur dann behaupten, dass das eine die Ursache des anderen ist, wenn das eine dem anderen regelmässig vorausgeht, und wenn ihre Modifikationen miteinander verbunden sind. Aus allen angegebenen Thatsachen scheint hervorzugehen, dass VOLTAs galvanische Säule nur wirkt, wenn die leitende Flüssigkeit zwischen den Platten das Zink oxydiert; und dass im Verhältnis, als mehr Sauerstoff in einer gegebenen Zeit sich mit dem Zink verbinden kann, auch die Kraft der Säule, Wasser zu zersetzen und den Schlag zu geben, zunimmt. Es scheint demnach vernünftig zu schliessen, dass, obwohl wir auf Grund der zur Zeit bekannten Thatsachen ausser stande sind, den genauen Verlauf des Vorganges zu erklären, die Oxydation des Zinks in der Säule und der chemische Vorgang dabei auf irgend eine Weise die Ursache des auftretenden elektrischen Effektes sind.

Die Stellung, welche VOLTA in diesem Streite einnahm, und die zu geringe Würdigung, welche er den chemischen Erscheinungen zu Teil werden liess, muss nach der heutigen Entwickelung der Angelegenheit zwar als erklärlich, aber doch als einseitig angesehen werden. Die ursprüngliche Ansicht, die Berührungsfläche von Metall und Flüssigkeit auch noch als Sitz elektromotorischer Kraft anzusehen, wird später unter Vortritt von VOLTA (vgl. OSTWALD, Kap. X, 2, VOLTAs zweite Abhandlung über die Säule, 1802) immer mehr aufgegeben und nur noch die einfache Berührung der Metalle als die eigentliche Ursache betrachtet. Bei aller Klarheit in der Auffassung der physikalischen Seite der Erscheinungen wusste VOLTA mit den elektrochemischen Vorgängen nicht viel anzufangen. Hier traf seine geistige Grösse auf eine Schranke, wodurch ein Mangel in der Anpassungsfähigkeit an die Thatsachen entstand. Diese in der Wissenschaftsgeschichte durchaus nicht selten wiederkehrende Erscheinung stellte nur hier gerade bei VOLTAs grossem Autoritätseinfluss auf seine Nachfolger ein erhebliches Hindernis für das Durchdringen der richtigeren gegnerischen Anschauung dar und insofern eine verhältnismässige Entwickelungshemmung; man müsste denn die durch einen derartigen wissenschaftlichen Streit gegebenen Anregungen als ausreichenden Ersatz gelten lassen.

Die immer einseitiger werdende Auffassung VOLTAs und seiner Anhänger in Verbindung mit einer Perpetuum mobile-Vorstellung der Säule folgt z. B. aus folgender Stelle eines Berichtes an das Pariser Nationalinstitut, 1803 (vgl. OSTWALD, X, 3):

Seit man sich überzeugt hat, dass die Berührung der Metalle das wesentliche elektrische Element der gewöhnlichen VOLTAschen Säule ist, und dass die Wirkungen der Oxydationen, welche die zwischenliegenden feuchten Scheiben in den Metallen hervorbringen, keinen vergleichbaren Anteil an der ganzen Wirkung haben, darf man einen galvanischen Apparat von dauernder und konstanter Wirkung, der keiner Reinigung der Platten bedarf, für keine Chimäre halten.

Die für diese Anschauung ins Treffen geführte Wirksamkeit der sogenannten trockenen Säule fand zwar durch ERMANs Nachweis (1807) der stets vorhandenen Feuchtigkeit in den Zwischenschichten ihre Widerlegung, doch galt hier, wie auch noch später wiederholt, der Einwand der Physiker, dass viele kräftige chemische Prozesse mit keiner, oder nur geringer Elektrizitätserregung verknüpft seien, als hinreichende Widerlegung der elektrochemischen Theorie; wie wir heute wissen, mit Unrecht, denn der wesentliche Umstand wurde dabei stets übersehen, dass eine räumliche Trennung des Oxydations- und Reduktionsvorganges für die Bedingung des Entstehens elektrischer Vorgänge aus den chemischen das Haupterfordernis bildet. Zwar hatte RITTER bereits bei Erklärung der von BUCHHOLZ beobachteten Erscheinung (vgl. **10**) auf diesen Umstand als notwendig hingewiesen, jedoch, wie

so häufig, war diese Anschauung mit zu wenig Nachdruck und ohne hinreichende experimentelle Unterstützung erwähnt worden und daher ohne Nachwirkung geblieben.

Wie stark damals dieser Scheingrund, unterstützt durch VOLTAS Autorität war, geht aus dem Umstand hervor, dass sogar DAVY umgestimmt wurde und sich in der Hauptsache zu VOLTAS Auffassung bekehren liess. Dem gegenüber bietet die im Jahr 1805 von dem zwanzigjährigen GROTTHUSS auf Grund sorgfältiger Beobachtungen entwickelte Anschauung über die Leitung der Elektrizität in Elektrolyten einen bemerkenswerten Grundgedanken (vgl. OSTWALD, X, 7). Es ist dies die Vorstellung über die gleichzeitige Lösung und Bindung der polarisierten Molekeln in jedem die Elektroden verbindenden Flüssigkeitsfaden in Verknüpfung mit Umlagerung und Transport von Molekel und Elektrizität; sie erlitt zwar durch die moderne Theorie der elektrolytischen Dissociation eine Änderung in Richtung besserer Übereinstimmung der energetischen Anforderungen, hat aber in unseren heutigen Vorstellungen noch wertvolle Bestandteile hinterlassen.

Es sei sogleich hier erwähnt, dass die ganze anscheinend mehr chemische Frage der mit dem Galvanismus eng verknüpften elektrolytischen Elektrizitätsleitung doch auch für die Elektrophysik grosse Bedeutung besitzt, da nähere Aufschlüsse über das Wesen der Elektrizitätsleitung überhaupt hiermit in nächster Beziehung stehen dürften. Die gegenwärtigen Hauptprobleme der Elektrophysik, die elektrischen Ausgleicherscheinungen in Gasen mit den verschiedenerlei „Strahlungen“, wie Kathoden-, Röntgen-, Kanal-, Becquerelstrahlen, weisen wenigstens darauf hin.

Ein hinsichtlich der Zeit (1801) interessanter energetischer Vergleich von Wärme und Elektrizität findet sich in SIMONS Bemerkung im Anschluss an die in **12** erwähnten Untersuchungen (vgl. OSTWALD, Kap. VII, 4):

> Ich habe schon mehrere Wahrnehmungen gemacht, welche mir für die Meinung zu sprechen scheinen, dass die VOLTAsche Säule sehr geeignet ist, mehrere Stoffe in einen Zustand zu versetzen, wo wir einen vorzüglichen Anteil gebundenen Wärmestoffes in ihnen annehmen.

15. Poissons Behandlung der Elektrostatik.

Die mathematische Behandlung der elektrischen Erscheinungen und die Darstellung der Beziehungen standen in dieser Periode noch ganz im Zeichen der Elektrostatik und knüpften an die Arbeiten von COULOMB an. Nach dieser Richtung wären hier sonach nur die Arbeiten von POISSON, namentlich diejenigen „über die Verteilung der Elektrizität auf der Oberfläche von Leitern“ (1811) zu erwähnen, worin POISSON von der LAPLACEschen Gleichung ausgehend eine Reihe von Beziehungen entwickelt, welche in dem für die Elektrophysik der späteren Periode stark hervortretenden rechnerischen Hülfsmittel der sogenannten Potentialtheorie eine wichtige Rolle spielen. Gleichzeitig lieferten die Rechnungen POISSONS eine hinreichend übereinstimmende Theorie für die Beobachtungen COULOMBS (vgl. hierzu **31**).

16. Oerstedts Entdeckung als Verzweigungsstelle.

1820—1850. Nach der verhältnismässigen Ruhepause in der Entwickelung der Elektrophysik im zweiten Decennium des 19. Jahrhunders, setzte dieselbe im dritten um so kräftiger wieder ein, namentlich wenn man den Folgenreichtum der Ansätze dieses Zeitraumes in Betracht zieht. Wurde auch die Auffindung des Zusammenhanges zwischen den elektrischen Ausgleicherscheinungen und den magnetischen Erscheinungen noch nicht sogleich in ihrer volleren Bedeutung erkannt und in ihrer späteren technischen Entwickelung auch nicht annähernd geahnt, so dass die Entdeckung OERSTEDTS

(1820) fürs Erste namentlich die galvanische Messtechnik förderte, so bereitete gerade dieser Umstand den Boden für die wichtigen nachfolgenden Entdeckungen OHMS und FARADAYS. Von früheren mehr zufälligen elektromagnetischen Beobachtungen ohne weitere Folgen wäre die durch FRANKLIN bemerkte Magnetisierung von Stahlnadeln, nachdem durch sie hindurch eine Funkenentladung stattgefunden hatte, zu erwähnen; nach MARUMS Nachweis erfolgte dieselbe aber durch den Erdmagnetismus mit Hülfe der durch die Funkenentladung verursachten Erschütterung. Die von COULOMB nachgewiesenen analogen Beziehungen bei Magnetismus und ruhender Elektrizität hatten in der Folgezeit vielfach Versuche veranlasst, diese beiden in ursächlichen Zusammenhang zu bringen, doch stets vergebens (vgl. OSTWALD, Kap. XI, 3). Um so erstaunter waren die Physiker, als OERSTEDT die Entdeckung dieses durchaus nicht nach dieser Richtung vermuteten Zusammenhanges durch ein lateinisch abgefasstes und an viele Gelehrte verschicktes Quartblatt (datiert vom 20. Juli 1820) bekannt machte. Man muss anerkennen, dass er die nächstliegenden Versuche über die Ablenkungserscheinungen der Magnetnadel durch das Stromfeld ausreichend variierte, um die wichtigsten Schlussfolgerungen ziehen zu können, was er mit folgenden Worten (Übersetzung nach GILBERT vgl. OSTWALD, Kap. XI, 3) that:

Aus allen diesem lassen sich einige Momente zur Erklärung der Erscheinungen ableiten. Der elektrische Konflikt vermag nur auf die magnetischen Teile der Materie zu wirken. Alle nichtmagnetischen Körper scheinen für den elektrischen Konflikt durchgängig zu sein, die magnetischen Körper dagegen, oder vielmehr ihre magnetischen Teilchen, dem Hindurchgehen dieses Konfliktes zu widerstehen, und daher kommt es, dass sie durch den Stoss der kämpfenden Kräfte in Bewegung gesetzt werden können.

Dass der elektrische Konflikt nicht in dem leitenden Drahte eingeschlossen, sondern ziemlich weit zugleich in dem umgebenden Raume verbreitet ist, ergiebt sich aus den angeführten Beobachtungen hinlänglich.

Es lässt sich auch aus dem, was beobachtet worden war, schliessen, dass dieser Konflikt in Kreisen fortgehe, denn es scheint ohne diese Annahme nicht begreiflich zu sein, wie derselbe Teil des verbindenden Drahtes, der, unter einen Pol dieser Magnetnadel gestellt, sie nach Osten treibt, sie nach Westen bewegen sollte, wenn er sich über diesem Pol befindet; eine Kreisbewegung geht aber an den beiden entgegengesetzten Enden eines Durchmessers in entgegengesetzten Richtungen vor sich.

Zu bemerken wäre nur, dass seine Bezeichnung „elektrischer Konflikt“ für die Feldwirkung des Stromes auf die Magnetpole mit kleiner Abänderung auch für unsere heutige Auffassung eigentlich noch brauchbar ist, wenn man die Bewegungserscheinung als das Ergebnis, beziehungsweise als die Lösung eines „elektromagnetischen Konfliktes“, d. h. als Kontrastwirkung zweier magnetischer Felder auffasst.

Die Fülle von wichtigen Versuchen und Entdeckungen, welche sich in der hier betrachteten Periode an OERSTEDTS Bekanntmachung anschlossen und dieselbe bis zu einem gewissen Grade zur Grundlage hatten, lässt sich in zusammengehörige Entwickelungsreihen einordnen. Dieselben laufen zwar nicht völlig getrennt nebeneinander, sondern weisen, abgesehen von dem mehrfach vorhandenen Zusammenhang durch die Person des Forschers selbst, namentlich in der galvanischen Messtechnik vielfach Berührungspunkte auf. Immerhin kann aber die getrennte Verfolgung der Entwickelungsreihen zur Erleichterung der Übersicht beitragen. Als erste dieser Entwickelungsreihen mag die Ausbildung der Galvanometer selbst angesehen werden. Als zweite Entwickelungsreihe im unmittelbaren Anschluss an OERSTEDTS Beobachtung der Wechselwirkung zwischen Strom und permanentem Magnet wären die

Untersuchungen der Feldwirkung elektrischer Ströme anzusehen, welche in Paris von ARAGO, AMPÈRE, BIOT als erste in Angriff genommen wurden. Dieselben bildeten einerseits den Ausgangspunkt zu einer neuen in das engere Gebiet des Magnetismus hinüberleitenden Reihe, den Erscheinungen an Elektromagneten (vgl. Magnetismus); andererseits zeitigten sie durch Aufstellung der AMPÈREschen elektrodynamischen Grundformeln und seiner Theorie der permanenten Magnete als direkte Fortsetzung die später anschliessenden mathematischen Behandlungen elektrischer Probleme durch AMPÈRE selbst, ferner durch WEBER und andere. Eine weitere Entwickelungsreihe wird die aus der vorigen Periode herübergenommene Untersuchung der VOLTAschen Säule bezw. Kette bilden, da hier die Benutzung der neu aufgefundenen Ausgleichwirkung als Messmittel dem Forscher neue Aufschlüsse versprach. Die hierbei gewonnenen ausserordentlich wichtigen Ergebnisse lassen aber eine nochmalige wichtige Unterteilung dieser gleichsam zweifachen Entwickelungsreihe erkennen, insofern die einen Untersuchungen sich mehr auf die rein physikalischen Ausgleicherscheinungen beziehen, die anderen mehr die elektrochemische Seite betonen. Jene Entwickelungsreihe als dritte würde ihren Höhepunkt bezüglich der Wichtigkeit in den Arbeiten von OHM (1825—1827) finden, diese als vierte in der Auffindung des Gesetzes der festen chemischen Aktion durch FARADAY (1834). Als Ausgangspunkt der fünften Entwickelungsreihe kann die mit den vorerst unaufgeklärten Erscheinungen des sogenannten Rotationsmagnetismus ARAGOs zusammenhängende Entdeckung der „Induktion" durch Faraday (1831) gelten, wenn man unter dieser mehrdeutigen Bezeichnung hier die Erzeugung von elektrischer Spannung in Leitern beim Schneiden magnetischer Kraftlinien versteht.

Die von SEEBECK (1821) bald zu Anfang der Periode neu aufgefundene thermoelektrische Spannungserregung, sowie die Umkehrung dieser Erscheinung durch PELTIERs Entdeckung (1838) stehen mehr ausserhalb, wenn auch messtechnisch mit OERSTEDTs Entdeckung in Verbindung. Die Arbeiten JOULEs hingegen, welche an die OHMsche Entwickelungsreihe anschliessen, leiten bereits zu dem gegen Ende der Periode entdeckten Prinzip der Erhaltung der Kraft hinüber.

17. Hauptzweige der Periode von 1820—1850.

Verfolgt man zunächst einmal jene an OERSTEDTs Entdeckungen anschliessenden Entwickelungsreihen nur in grossen Zügen, so knüpft sich die Ausbildung des Galvanometers in den Jahren 1820—1825 namentlich an die Namen SCHWEIGGER, POGGENDORF, NOBILI und lieferte ein mehr als ausreichend empfindliches Messinstrument für strömende Elektrizität, so dass diese Empfindlichkeit stellenweise sogar wohl die Unterscheidung wesentlicher Erscheinungen und unwesentlicher bezw. störender Begleiterscheinungen, an denen es bei Benutzung der sogenannten Hydroketten nicht fehlte, öfters erschwerte. Für den Zusammenhang zwischen Stromstärke und Ausschlag fand erst 1837 POUILLET für die direkt zeigenden Instrumente Form und Gesetz, während W. WEBER in der Zeit von 1834 bis 1841 sein dynamometrisches, d. h. von permanenten Magneten unabhängiges Messinstrument entwickelte.

In der zweiten Entwickelungsreihe wäre zunächst zu erwähnen, dass die Umkehrung der ponderomotorischen Einwirkung zwischen elektrischem Strom und Magnet, d. h. die Ablenkung eines beweglichen Stromleiters durch einen genäherten Magnet auch von OERSTEDT beobachtet wurde (vgl. HOPPE § 138). Es schliesst sich der Zeit nach sogleich an und bildet die Grundlage für die Entwickelung der Elektromagnete die von ARAGO herrührende wichtige

Ergänzung zu OERSTEDTS Entdeckung, dass jeder Strom nicht nur permanente Magnete ablenke, sondern selbst magnetisiere, sowie, dass jeder stromdurchflossene Leiter in Solenoidform selbst die Eigenschaften eines Magneten zeige und zwar unabhängig vom Metall des (anfangs selbst aus Eisen gewählten) Leiters. Unabhängig davon scheint SEEBECK auch noch im Jahre 1820 dieselben Entdeckungen gemacht zu haben (vgl. HOPPE § 142), der sich schon früher mit Magnetismus beschäftigt und im Jahre 1810 Kobalt und Nickel als in gleicher Weise magnetisch wie Eisen erkannt hatte. Die wohl bedeutsamsten Arbeiten dieser Entwickelungsreihe bilden aber die in den letzten Monaten des Jahres 1820 in Paris ausgeführten Untersuchungen AMPÈRES, der in Genf durch ARAGO mit OERSTEDTS Entdeckung bekannt gemacht sogleich mit Feuereifer und wachsendem Erfolg diese Erscheinungen untersuchte. Bereits am 2. Oktober legte er der Pariser Akademie seine durch Klarheit berühmte Abhandlung vor, welche nicht nur wertvolle Ergänzungen hinsichtlich der Bewegungserscheinungen zwischen stromdurchflossenem Leiter und permanentem Magnet, sondern auch die Grundthatsachen der ponderomotorischen Wirkungen zwischen zwei stromdurchflossenen Leitern, d. h. der elektrodynamischen Phänomene enthielt, sowie im Anschluss hieran seine erste Theorie der permanenten Magnete und des Erdmagnetismus mit Hülfe von elektrischen Kreisströmen, ja sogar auch die erste Idee eines elektromagnetischen Telegraphen.

Noch in demselben Monat (am 30. Oktober 1820) erfolgte dann die Vorlegung einer vielleicht ebenso wichtigen Arbeit von BIOT, worin auf Grund der in Gemeinschaft mit SAVART durchgeführten Untersuchungen das fundamentale Gesetz über die Kraftwirkungen zwischen Leiterstrom und Magnet ausgesprochen wird, sowohl bezüglich ihrer Richtung als auch ihrer Grösse abhängig von der Entfernung. Die experimentellen Nachweise über die wechselseitigen Antriebe zwischen Leiterstrom und Magnet wurden durch den hier zum erstenmal auftretenden FARADAY vervollständigt unter Konstruktion der ersten elektromagnetischen Rotationsapparate (1821). Anschliessende Arbeiten von AMPÈRE führten einerseits zur weiteren Ausgestaltung seiner Theorie der Magnete — Zusammensetzung derselben aus Molekularmagneten, sowie zur theoretischen Ersetzbarkeit eines Magneten durch ein „Solenoid“ — andererseits zur mathematischen Ableitung des Grundgesetzes der Elektrodynamik über die Kraftwirkung zwischen zwei beliebig gelegenen stromdurchflossenen Leiterelementen (1823).

An die Resultate AMPÈRES wurde erst etwa zehn Jahre später von W. WEBER wiederum angeknüpft, als er AMPÈRES Ableitungen messend verfolgen wollte und so 1834 zu den ersten dynamometrischen Versuchen schritt, aus denen sich bis 1841 das WEBERsche Elektrodynamometer entwickelte. Dieses namentlich später (vgl. **40**) wegen seiner Unabhängigkeit von permanenten Magneten für die Wechselstrommesstechnik sehr bedeutungsvolle Instrument weist sonach gegenüber dem bisherigen galvanometrischen Messprinzip eine ganz wesentliche Unterscheidung auf. An die Aufstellung des hierfür geltenden Gesetzes der quadratischen Wirksamkeit, sowie an die Bestätigung des AMPÈREschen Fundamentalgesetzes schloss WEBER seine theoretischen Betrachtungen an, welche den Zweck verfolgen, alle elektrischen Erscheinungen in einem Grundgesetz zu vereinigen, das unter seinem Namen bekannt ist (vgl. **97**). Diese in das Gebiet der theoretischen Physik überleitenden Arbeiten führten später zu weiteren von NEUMANN, HELMHOLTZ u. a.,

welche für längere Zeit die mathematische Seite, vielleicht mehr als vom technischen Standpunkt aus wünschenswert, in den Vordergrund der elektromagnetischen Wissenschaft brachten.

Die inzwischen (1821) in Deutschland durch Seebeck gemachten thermoelektrischen Entdeckungen, sowie die von Davy (1822) vorgenommenen Untersuchungen über den Leiterwiderstand, abhängig von den Dimensionen und dem Material, bereiteten den Boden für die sich schliesslich als das wichtigste Ereignis der dritten Entwickelungsreihe herausstellende Auffindung des Ausgleichgesetzes für stationäre elektrische Strömungen durch Ohm (1825 bezw. 1826). Allerdings wurde dasselbe erst viele Jahre später in weiteren Physikerkreisen, namentlich im Auslande, bekannt, als Pouillet eine Nachprüfung desselben mit der von ihm erfundenen Tangenten- und Sinusbussole im Jahre 1837 veröffentlichte. Volle Würdigung erlangte das nach Ohm genannte Gesetz eigentlich erst seit Entwickelung der Elektrotechnik; ja man schoss alsdann vielleicht sogar etwas über das Ziel hinaus, indem man über die ursprüngliche Bestimmung für stationäre elektrische Strömungen hinausgehend allerhand andere, der Form nach analog gebildete Ausgleichbeziehungen in engere Verbindung mit dem Namen Ohms und mit seinem Gesetz brachte, als die Sache rechtfertigte.

Bestätigung und Anerkennung fand Ohm anfangs nur durch die Arbeiten von Fechner (1829). Eine weitere Anregung zur Untersuchung der elektrophysikalischen Ausgleicherscheinung wurde durch die gleichzeitig fortgesetzten reibungselektrischen Versuche gegeben. So diente der Ausgleich von Reibungselektrizität Wheatstone (1834) zur Messung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit elektrischer Antriebe, Faraday zur Untersuchung über Funkenentladung, Dielektrikumseigenschaften u. a., Riess (1838) zu Untersuchungen der Wärmeentwickelung und Ausgleichwiderstände. Die letzteren waren aber namentlich in ihrem Einfluss auf stationäre Strömung der Gegenstand vielfacher Untersuchung, wobei der schon von Davy und Ohm qualitativ beobachtete Temperaturkoeffizient durch Lenz 1835 und 1838 gesetzmässig bestimmt wurde. Den im Jahre 1840 entstehenden ersten Widerstandssätzen (Rheostaten) von Wheatstone (vgl. **26**), Poggendorf, Jacobi aus metallischen Leitern, sowie Jacobis Flüssigkeits-Stromregulator folgten ein Jahr später die an Davys Versuche (1822) anknüpfenden wichtigen Untersuchungen von Joule, welche den für das Energieprinzip so wichtigen Zusammenhang zwischen Wärme, Widerstand und Stromstärke aufdeckten. Dieses bereits von Joule auf flüssige Leiter ausgedehnte Gesetz fand sich bei Nachprüfung durch (den jüngeren) A. E. Becquerel (1844) und Poggendorf (1848) allgemein bestätigt, ebenso wie dasjenige von Ohm, welches in den Jahren 1848 und 1849 nochmals von R. Kohlrausch sorgfältig nachgeprüft keine Ausnahmen erkennen liess.

Die immer wieder auftauchenden Zweifel über die Wesensgleichheit von sogenannter „gemeiner“, d. h. Reibungselektrizität und galvanischer, auch Voltaelektrizität genannt, gaben bei neu auftretenden Erscheinungen der letzteren immer wieder neue Veranlassung zu Versuchen, um die gleichen Erscheinungen mit der bei der Entladung strömenden Reibungselektrizität herbeizuführen, was schliesslich nicht nur immer gelang, sondern auch zu mancherlei neuen Entdeckungen führte. Eine solche Veranlassung bildete den Ansatz zu unserer vierten Entwickelungsreihe und führte Faraday schliesslich zur Auffindung eines grundlegenden Gesetzes, welches den Zu-

sammenhang zwischen der mit dem Namen Elektrizitätsmenge bezeichneten elektrischen Grösse und den chemischen Verbindungsgewichten aufdeckte (1833). Das Gesetz der elektrochemischen Äquivalente wurde gleichsam als zweiter Teil jenes Gesetzes ein Jahr später hinzugefügt. Nachdem Faraday nämlich bei Inangriffnahme einer für den damaligen Wissensstand möglichst umfassenden Lösung der Wesensfrage die qualitative Übereinstimmung der beiden Elektrizitätsarten erwiesen hatte (Exp. Res. III), ging er zur messenden Vergleichung über, wobei bemerkenswert ist, dass er Ohms Arbeiten und Resultate zur Zeit nicht kannte.

Diese elektrochemischen Untersuchungen liessen nicht nur den Kampf über die Ursache der galvanischen Elektrizitätserregung zwischen Voltas Anhängern und den Vertretern der elektrochemischen Theorie mit Faraday an der Spitze wiederum viel heftiger entbrennen, sondern förderten auch die Entwickelung der elektrischen Stromquellen. Die bereits früher, namentlich aber von Ohm (1827) und Fechner (1829) beobachtete Inkonstanz der „Hydroketten", deren Ursache in der sogenannten Polarisation durch Gasentwickelung an der positiven oder Ableitungselektrode erkannt wurde, führte 1837 zunächst Becquerel, namentlich aber Daniell zur Ausbildung eines sogenannten konstanten Elementes, bei welchem das Wegschaffen des polarisierenden Gases durch Anwendung einer zweiten durch poröse Scheidewand von der ersten Erregerflüssigkeit getrennten Oxydationsflüssigkeit erzielt wird. Die Auffindung der Gasketten, sowie eines stärkeren Elementes durch Grove (1839), sowie weitere Primärelemente schlossen sich an. Untersuchungen über die elektrochemische Zersetzung von Metallsalzlösungen führten Jacobi zur Entdeckung der Galvanoplastik (1839—1840), der eigenartige Geruch bei Wasserzersetzung, sowie die erhaltene, hinter dem Gesetz von Faraday zurückbleibende Gasmenge zur Auffindung des Ozons durch Schönbein (1840), während die Polarisation durch Poggendorf (1844) und Lenz (1843 und 1846) weitere Prüfung erfuhr.

Während man sich so um die Verbesserung der Elektrizitätsquellen in Gestalt der Primärelemente bemühte, war bereits von Faraday (1831) als Ausgangspunkt unserer fünften Entwickelungsreihe eine Entdeckung gemacht worden, welche an Entwickelungsfähigkeit in technischer Hinsicht alle anderen überragte, wie sich später herausstellte. Für den gegenwärtigen Entwickelungsstand, in welchem die Aussicht einer Verdrängung der Dynamos als primäre Energiequellen durch irgend welche elektrochemische Prozesse noch kaum als nennenswert erscheint, dürfte es angebracht sein, 1831 als das Geburtsjahr der Starkstromtechnik zu bezeichnen, da in ihm Faradays Untersuchungen zur Entdeckung der von ihm als sogenannte Volta- und Magnetinduktion unterschiedenen Vorgänge führten. Diese Trennung, welche durch die damalige Sonderstellung der permanenten Magnete veranlasst war, ist jetzt der einheitlichen Auffassung des magnetischen Feldes gewichen. Allerdings reichen die Anfänge dieser Entwickelungsreihe und somit der erste Keim der Starkstromtechnik weiter zurück bis auf die ersten, jedoch unverstandenen Beobachtungen von Arago (1824) über die unter dem Namen „Rotationsmagnetismus" zusammengefassten Erscheinungen, welche, wie wir heute wissen, auch auf Induktion von sogenannten Wirbelströmen in körperlichen Leitern beruhen. Dieselben wurden sogar bereits 1826 von Seebeck zur Metalldämpfung schwingender Magnete benutzt, aber so viele Forscher sich auch mit diesen Erscheinungen beschäftigten, so fand doch keiner die

richtige Ursache, nicht einmal AMPÈRE, dem sie bei seiner Theorie der Magnete eigentlich hätte besonders nahe liegen sollen. Erst als FARADAY diese Erscheinungsgruppe zum ersten Gegenstand seiner bewunderungswürdigen „Experimentaluntersuchungen“ machte, welche in dreissig fortlaufenden Serien erschienen und eine geradezu erstaunliche Menge wertvoller Entdeckungen und Klarlegungen enthalten, wurden die qualitativen Grundlagen der „Induktion“, d. h. der Spannungserregung in jedem von Kraftlinien geschnittenen Leiter, in allen denkbaren Kombinationen von ihm experimentell festgestellt.

Erwähnt muss noch werden, dass der Amerikaner HENRY unabhängig von FARADAY und gleichzeitig, vielleicht sogar einige Tage früher, bei seinen Versuchen an einem grösseren Elektromagneten die Erscheinung der „Induktion“ auffand, die Grundthatsache auch richtig formulierte, aber die vollere Bedeutung der Erscheinung nicht erkannte, was bei FARADAY unter Leitung der gerade damals von ihm entwickelten Hülfsvorstellung der magnetischen Kraftlinien der Fall war. Durch Verfolgung der Vorstellung wurde er dazu gebracht, die Erscheinung nach ihren verschiedenen Seiten hin aufzudecken und so seine Entdeckung nachhaltig zu gestalten. Schon im darauffolgenden Jahre (1832) begegnet man den ersten auf FARADAYS Entdeckung beruhenden magnetelektrischen Induktionsmaschinen von DAL NEGRO und von PIXII. Diese sich rasch weiter entwickelnden Magnetmaschinen, welche anfangs nur als Wechselstrom-, doch von 1836 an auch mit Kommutator als Gleichstrommaschinen (vgl. Geschichtliches in Band III über Dynamos) ausgeführt wurden, führten aber doch lange ein fast ausschliesslich elektrophysikalisches Dasein, bis W. VON SIEMENS 1867 das Dynamoprinzip fand, wodurch die Entwickelungsreihe technisch mannbar wurde und ihre bekannte ungemein kräftige technische Entfaltung erfuhr.

Was die weitere Erforschung der Induktionserscheinungen selbst anlangt, so wurde FARADAY bald durch andere Versuche über die Reibungselektrizität und die elektrochemischen Zersetzungserscheinungen (vgl. oben) abgelenkt und kam nur gelegentlich, wie bei der von JENKINS und MASSON (1834) gemachten, aber unverstandenen Entdeckung des Einflusses der Selbstinduktion, auf dieses Gebiet wieder zurück, um aufklärend zu wirken. Von anderen an FARADAYS Untersuchungen anknüpfenden Forschern that sich besonders LENZ durch Formulierung (1834) und erste quantitative Untersuchung (1835) der Induktionserscheinungen hervor, später (1838) noch in Gemeinschaft mit JACOBI. Die späteren Untersuchungen des Amerikaners HENRY (1840—1841) bezogen sich hauptsächlich auf die Induktionswirkungen höherer Ordnung, ohne jedoch die beobachtete zunehmende Schwächung durch Streuung erklären zu können. Die Eigenschaften des Stromverlaufs bei Induktionsstössen machten EDLUND (1849) und HELMHOLTZ (1851) zum Gegenstaud ihrer Untersuchungen. Nach diesem kurzen orientierenden Überblick möge wiederum eine etwas eingehendere Betrachtung nach den anfangs erwähnten Gesichtspunkten geordnet folgen.

18. Reibungselektrische galvanische und thermische Spannungserzeugung.

Hält man bei Behandlung der Spannungserzeugung für die Ursachen die chronologische Folge ihrer Entdeckungen ein, so käme zunächst die Reibungselektrizität. Hier sind naturgemäss weniger bemerkenswerte Neuerungen zu verzeichnen. Eine noch ziemlich umständliche und unvollkommene Influenzmaschine wurde 1831 von dem Italiener BELLI angegeben (vgl. HOPPE § 260), die Konstruktion einer „Dampfelektrisiermaschine“ von ARMSTRONG (1845),

nachdem ein Zufall 1840 die elektrische Spannung zwischen dem aus einem Ventil ausgeströmten Dampf und dem Ventil ergab, und FARADAY als Ursache hiervon die zwischen Ventil und dem schon zu Wassertröpfchen kondensierten Dampf auftretende Reibung nachgewiesen hatte (1843, Exp. Res. XVIII). Der aus ARMSTRONGS isoliert aufgestelltem Kessel durch einen mit dem gleichfalls isolierten Kondensator verbundenen Metallkamm ausströmende Dampf lieferte erhebliche Mengen Reibungselektrizität von so hoher Spannung, dass Funken von 22 Zoll (56 cm) Länge erhalten wurden. (Weiteres siehe **81**.)

Die chemo-elektrische Spannungserregung, wie wir nach dem heutigen Wissensstande die galvanische oder auch Voltaelektrizität zu nennen haben, war anfänglich noch auf die „Hydroketten", d. h. Primärelemente mit zwei verschiedenen Metallen, meist Zink und Kupfer, und einer Flüssigkeit, meist angesäuertem Wasser, beschränkt. Dass unter diesen Verhältnissen die Inkonstanz der Elektrizitätsquellen, d. h. die durch die Polarisation erzeugte und vom Stromschluss ab mehr oder weniger rasch erfolgende Abnahme der resultierenden Spannung und damit der Stromstärke auf die meisten Untersuchungen störend und lästig wirkte, kann kein Wunder nehmen. Hierin lag auch die Ursache, warum die erste Fassung des Ausgleichgesetzes durch OHM, trotz grosser Sorgfalt beim Arbeiten und trotz des Bestrebens, die aus jenem „Wogen der Kraft" entspringenden Fehler nach Möglichkeit zu vermeiden, eine missglückte war und erst unter Benutzung eines Thermoelementes gelang (vgl. **24**). Das Kämpfen der Forscher mit der zur Auffindung der meisten Quantitätsbeziehungen unerlässlichen Konstanz der elektrischen Spannung darf heute für die richtige Wertschätzung nicht übersehen werden, da es sich um die „in dieser Region oberste Thatsache" handelt, wie OHM (POGG. Ann. 1826) die ursächlich wirkende Spannung treffend bezeichnet; am besten drückt dies folgender Satz des Petersburger JACOBI über die von ihm unabhängig von DANIELL erfundene konstante Kette (1838) aus:

> Obgleich immer einige Aufsicht nötig ist, liegt der Vorteil eigentlich darin, dass man überhaupt imstande ist, die Kette konstant zu erhalten, was bei allen anderen einigermassen kräftigen Apparaten bisher nicht möglich war, man mochte sich quälen wie man wollte. Ich habe wer weiss was angestellt, um diesen wichtigen Zweck zu erreichen; alles hatte aber seine Grenzen, die, wenn sie überschritten waren, keine Wiederherstellung der Kraft zuliessen. Die bisherigen galvanischen Apparate konnten einen wirklich zur Verzweiflung bringen.

Bei der durch das Galvanometer gesteigerten Empfindlichkeit in der Beobachtung ergab sich zunächst die Entdeckung einiger bisher unbemerkt gebliebener Ursachen der Spannungserzeugung. So fand A. C. BECQUEREL (1823), dass beim ungleichzeitigen Eintauchen zweier aussen zum Stromkreis verbundener Stücke von gleichem Metall in Säure ein Strom entsteht, d. h. Spannungserregung stattfindet, ebenso die mit dem Namen Kapillarströme bezeichnete Erscheinung, dass Platinschwamm gegenüber einem verdünnte Salzsäure enthaltenden Platingefäss elektrische Spannung aufweist, solange die verdünnte Salzsäure in jenem emporgesaugt wird. Eine weitere Spannungserregung bei nur einem Metall (Platin) fand er im gleichen Jahr (1824) bei Berührung des einen Bleches mit Säure, des anderen mit Alkali, eine Kombination von einem Metall und zwei Flüssigkeiten, welche als Säure-Alkali-Kette und bei späterer Ausbildung (1836) unter dem Namen Sauerstoffkette der Gegenstand vielfacher Erörterung wurde und durch ihre Kon-

stanz auffiel. Das Verdienst, die erste wirklich praktisch brauchbare konstante Kette konstruiert zu haben, muss wohl aber dem an FARADAYS Versuche anknüpfenden Engländer DANIELL (1837) zugeschrieben werden, welcher eine Batterie von zehn Elementen aus zwei verschiedenen Metallen und zwei Flüssigkeiten auf folgende Weise herstellte: Jedes Element bestand aus einem cylindrischen Kupfergefäss, das durch eine als poröse Scheidewand dienende Ochsengurgel von etwa halbem Cylinderdurchmesser des Kupfergefässes in zwei Räume geteilt war; in dem inneren Raum wurde dann ein Zinkstab hineingebracht und die umgebende verdünnte Säure mit Hülfe eines Glashebers ständig erneuert, in den von äusserem Kupfercylinder und Ochsengurgel gebildeten Hohlcylinder wurde als Wasserstoff absorbierende Flüssigkeit Kupfervitriollösung gebracht, welche alsbald zur Erhaltung der Sättigung mit den gleichen Krystallen in Verbindung gehalten wurde. DANIELL sagt hierüber (vgl. OSTWALD, Kap. XIV, 4):

Der Zweck bei der Konstruktion dieser Batterie war 1) die Zinkfläche möglichst klein zu machen, 2) das gebildete Zinkoxyd, das für die Wirkung der Batterie so schädlich ist, zu entfernen; und 3) das am Kupfer frei werdende Wasserstoffgas ohne Fällung einer das Metall verschlechternden Substanz zu absorbieren.

Wesentlich ist hierbei der dritte Punkt, während die beiden ersten später verlassen wurden. Ebenso wurde die wenig haltbare Ochsengurgel bald durch einen porösen Thoncylinder ersetzt. Unabhängig von DANIELL wurden ähnliche Zusammenstellungen von MULLINS (1836) und von M. H. JACOBI (1838, vgl. oben) angegeben. (Über weitere Ausbildung der Primärelemente siehe Band III).

DANIELL war es auch, der die von RITTER begonnenen Untersuchungen über Polarisationsbatterien (vgl. **10**) wieder aufgriff und namentlich Platin geeignet zur Polarisationselektrode fand (1837). Anschliessend an diese Versuche wurde GROVE (1839) zur Konstruktion seiner allerdings nur theoretisch interessanten „Gaskette“ veranlasst, bestehend aus einem Metall (Platin) und zwei Gasen (Wasserstoff und Sauerstoff), wobei Platin in Wasserstoff sich als positiv gegen Platin in Sauerstoff (negativ) herausstellte, wenn die beiden Gase durch angesäuertes Wasser in Verbindung standen. Die damals vielfach untersuchten und umstrittenen Polarisationserscheinungen, welche bereits ERMAN bei Seife als elektrolytischem Leiter zu der Theorie der unipolaren Leitung, FECHNER (1829) und POGGENDORF (1841) zu der jetzt gleichfalls verlassenen Aufstellung eines Übergangswiderstandes veranlassten, wurden zu Gunsten der von OHM bereits (1830) ausgesprochenen Auffassung als Gegenspannung oder Gegen-EMK durch VORSSELMANN DE HEER (1840—1841) unter Anwendung der Wechselströme magnetelektrischer Maschinen entschieden. Nachdem die chemische Seite der Polarisationserscheinung namentlich durch SCHÖNBEIN (1839) untersucht worden war, haben die anschliessenden quantitativen Untersuchungen über Polarisationsspannungen, zuerst von DANIELL und WHEATSTONE (1842), hierauf von LENZ (1843) und POGGENDORF (1846) mit Hülfe der hierzu erfundenen, nach letzterem benannten Wippe neben einigen endgültigen Ergebnissen auch verschiedene neuerdings abgeänderte Anschauungen geliefert, z. B. die über das Polarisationsmaximum (vgl. **38**). Gleichfalls angeregt durch diese Betrachtungen über die Schwächung der Spannung des Primärelements durch die in letzterem selbst an den Grenzflächen zwischen erregender Flüssigkeit und Metall auftretende Polarisation, erzeugt von dem Wasserstoff an der Ableitungselektrode, entstanden die kon-

[illegible] (1839) und BUNSEN (1841). Durch Anwendung [illegible] Säure (Salpetersäure), welcher die Aufgabe zu- [illegible] (bei GROVE: Platin) entstehenden Wasserstoff durch [illegible] zu machen, wurde eine für damalige Verhält- [illegible] der erregten Spannung gegenüber dem Daniell- [illegible]

[illegible] häufig bei grundlegenden Entdeckungen, so wurde auch die [illegible] (vgl. 10) Auffindung der thermoelektrischen Spannungserregung durch SEEBECK (1821) durch einen Zufall angeregt. Versuche über „die magnetische Polarisation", wie SEEBECK auf Grund der OERSTEDTschen Entdeckung die Vorgänge im Leiterkreis, d. h. den Strom und seine Feldwirkung nennt, ergaben Ablenkungserscheinungen bei dem mit der Hand bewirkten Aufeinanderhalten der Enden zweier verschiedener Metalle, zuerst Wismut und Kupfer. Nähere Untersuchung ergab die Handwärme bezw. die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Enden von verschiedenem Metall als Ursache der EMK oder der „magnetischen Spannung", wie SEEBECK sagt. Trotz seiner teilweise unrichtigen Vorstellungen (vgl. **30**) über „magnetische Atmosphäre" und dergleichen gelang es ihm bei der anschliessenden systematischen Untersuchung doch die wichtigsten Grundthatsachen der Thermoelektrizität richtig aufzufinden; so eine im wesentlichen später bestätigte thermoelektrische Spannungs*reihe*, ähnlich derjenigen VOLTAs, während die Bemühung ein analoges Spannungs*gesetz* (vgl. **10**) zu finden vergeblich blieb; weiterhin die Summenwirkung bei Hintereinanderschaltung nach Art unserer heutigen Thermosäulen; ferner die Stellung von Legierungen zu jener Reihe, die Unabhängigkeit der Spannung von der Grösse der Berührungsfläche, sowie ihre nicht proportionale Zunahme mit der Temperatur, ja die zuweilen bei Erhöhung der Temperaturdifferenz eintretende Abnahme, wenn auch erst W. THOMSON (1856) und AVENARIUS (1862) diese zuweilen bis zur direkten Umkehr gesteigerte Abnahme — eine solche beobachtete zuzuerst A. C. BECQUEREL (1826) bei Eisen-Kupfer — in ein Gesetz brachte. Dass er auch am Schluss seiner Arbeit nicht verfehlt den Erdmagnetismus auf Thermoströme, deren Resultante im allgemeinen dem Äquator folge, zurückzuführen, sei nebenbei erwähnt. Von späteren Forschern dieser Periode sei auf diesem Gebiet ausser A. C. BECQUEREL, der durch zahlreiche Untersuchungen die SEEBECKschen Untersuchungen teils bestätigte, teils erweiterte, noch OERSTEDT mit seiner Thermosäulenkonstruktion zur Bestimmung der Wärme*strahlen* (1823) erwähnt, sowie deren Verbesserung durch den Florentiner Physiker NOBILI (1834).

19. Faradays Entdeckung der „Induktion".

Die Auffindung der technisch wichtigsten Ursache der Spannungserregung, der elektrischen „Induktion" in Stromkreisen durch Änderung des von ihnen umschlossenen magnetischen Feldes, kann eigentlich nicht dem Zufall zugeschrieben werden, sondern erfolgte erst nach mehrmaligem vergeblichen Suchen durch FARADAY im August 1831. Abgesehen von der schon länger bekannten (vgl. **9**), nunmehr als Induktion erkannten Beeinflussung benachbarter Stromkreise bei Entladungen der Elektrisiermaschine, wurden Induktions*wirkungen* in Gestalt von induzierten Wirbelströmen zwar schon im Jahre 1824 durch ARAGO beobachtet und von vielen Forschern eingehend untersucht, die richtige Ursache jedoch nicht erkannt. ARAGOs Experiment, bei welchem eine freischwebende Magnetnadel über einer Kupferscheibe durch Drehen der letzteren gleichfalls in Drehung gerät, wird noch heute regelmässig in den Vorlesungen

über Experimentalphysik gezeigt. Da diese Erscheinungen des sogenannten „Rotationsmagnetismus“ in gewisser Hinsicht die Vorgeschichte zu jener wichtigen Entdeckung FARADAYS bilden, so sei das Wichtigste darüber angeführt. Die erste von DUHAMEL (1824) angeregte Erklärung führte die Erscheinung darauf zurück, dass durch die Magnetnadel Magnetismus in der Kupferscheibe induziert würde, und wurde merkwürdigerweise von den folgenden Forschern angenommen. Der die Wirkung schwächende Einfluss von Einschnitten wurde (1825) von CHRISTIE und von BALBAGE untersucht, die Schutzwirkung von zwischen Magnet und rotierende Scheibe gebrachten Metallscheiben von PREVOST und COLLADON (1825). SEEBECK bestimmte (1826) die dämpfende Wirkung für verschiedene, in gleicher Entfernung befindliche Materialien bei derselben Magnetnadel durch die Anzahl der ausgeführten Schwingungen beim Zurückgehen des Ausschlages von 45° auf 10°. Auch knüpfte er daran einen bemerkenswerten ersten Vorschlag zur Ausnutzung dieser Metallwirkung für Nadeldämpfung. Seine Zahlenreihe (vgl. P. A., VII, 208)

	Schichtdicke	Schwingungen
Marmor	beliebig	116
Quecksilber . . .	4·5 mm	112
Platin	0·9 „	94
Blei	1·65 „	89
Gold	0·45 „	89
Zink	1·1 „	71
Zinn	2·2 „	68
Kupfer	0·65 „	62
Silber	0·65 „	55
Eisen	0·9 „	6

ergab zwar die offenbare Ausnahmestellung von Eisen, doch wurde jene unrichtige Erklärung DUHAMELS erst von ARAGO selbst widerlegt (1826). Hierzu diente das Experiment mit der Abstossung des senkrecht zur Scheibe stehenden Magnetstabes, da bei induziertem Magnetismus Anziehung eintreten würde. Der Versuch einer neuen Erklärung unterblieb jedoch. Die Möglichkeit, bei dieser Rotationserscheinung den permanenten Magneten durch eine stromdurchflossene Spirale zu ersetzen, wurde sowohl von POHL als auch von AMPÈRE gezeigt (1826), doch fand merkwürdigerweise auch AMPÈRE die ihm bei seinen Anschauungen eigentlich sehr naheliegende Erklärung nicht. Eine der Pariser Akademie gemachte Mitteilung AMPÈRES vom 16. September 1822 lässt über seine Beobachtung der Induktionswirkung in einem benachbarten geschlossenen Stromkreis kaum einen Zweifel, doch scheint diese mehr zufällige Beobachtung unverstanden und ohne alle weiteren Folgen geblieben zu sein (vgl. Anm. zu Exp. Res. I, 2).

FARADAY von der Überzeugung ausgehend, dass die strömende Voltaelektrizität neben ihrer magnetischen Induktionswirkung bei Eisen und den soeben erwähnten Erscheinungen noch eine Induktionswirkung nach Analogie der Influenz bei elektrostatischer Elektrizität aufweisen müsste (vgl. Exp. Res. I, 1 u. 2), hatte bereits in den Jahren 1825 und 1828 Versuche nach dieser Richtung gemacht. Da er aber damals die vorgefasste Meinung besass, dass diese Induktionswirkung eine der Dauer des Primärstromes entsprechende sein müsse, so sah er die eigentlich richtig unternommenen Versuche als erfolglos an. Die ihm auf seine Fragestellung von der Natur gelieferte Antwort in Gestalt der beiden kleinen Induktionsstösse beim Schliessen

und Öffnen entsprach offenbar so wenig seinen Erwartungen, dass er dieselbe nicht richtig verstand und deshalb nicht weiter verfolgte. Erst als er im August 1831 die Versuche abermals erneuerte und diesmal anstatt Holz einen Eisenring nahm, waren die beiden Induktionserscheinungen so stark, dass sie ihm die Schwelle der durch vorgefasste Meinung bedingten Abneigung gegen das Umdenken überschreiten und die nachhaltige Entdeckung ausreifen liessen. Hierauf erfolgte unter Leitung der gleichzeitig von ihm innerlich ausgebildeten, wenn auch noch nicht klar formulierten Hülfsvorstellung der „Kraftlinien“, die Erschöpfung der möglichen grundlegenden Fälle der Induktion mit staunenswerter Folgerichtigkeit und Schnelligkeit. Die für die Elektrotechnik klassische Eintragung vom 29. August 1831 in sein Beobachtungsbuch lautet in der Übersetzung:

Ich hatte einen Eisenring anfertigen lassen (weiches Eisen) aus Rundeisen $^7/_8$ Zoll (22.2 mm) stark bei einem inneren Ringdurchmesser von 6 Zoll (19 cm). Viele Kupferdrahtwindungen wurden auf die eine Hälfte gewickelt und die Windungen durch Zwirn und Kaliko getrennt (NB. die einzelnen Windungen durch Zwirn, die Lagen durch Kaliko. Anm. d. H.); verwendet wurden drei Drahtlängen, jede ungefähr 24 Fuss (7.3 m) lang, welche verbunden als eine Länge, oder als getrennte Längen benutzt werden konnten. Bei Prüfung mit einem Trogapparat ergab sich jede als isoliert von der anderen. Diese Seite des Ringes will ich *A* nennen. Auf der anderen Seite, aber getrennt durch einen Zwischenraum, wurde Draht in zwei Stücken aufgewunden, zusammen etwa 60 Fuss (18.3 m) lang, der Wicklungssinn wie bei den vorigen Windungen. Diese Seite heisse *B*. Eine Batterie von zehn Plattenpaaren, je 4 Zoll (10 cm) im Quadrat, wurde beschickt. Die *B*-Seite wurde in eine Wicklung zusammengeschaltet und ihre Enden durch Kupferdraht verbunden, der in einiger Entfernung gerade über eine Magnetnadel führte (3 Fuss [1 m] vom Drahtring entfernt), dann die Enden des einen Drahtstückes auf der *A*-Seite mit der Batterie verbunden; sofort eine merkbare Wirkung auf die Nadel. Sie schwang und kam schliesslich in ihrer alten Stellung zur Ruhe. Beim Unterbrechen der Verbindung zwischen *A*-Seite und Batterie, wieder eine Störung der Nadel.

Fast einen Monat dauerte es nun, bis er sich innerlich mit dieser Erscheinung abgefunden und eine gewisse Vorstellung darüber gebildet hatte. Gestützt auf die letztere schritt er am 24. September zu einer neuen Fragestellung. Ein Eisencylinder wurde mit Draht umwickelt, letzterer mit dem Galvanometer verbunden und das Eisen als Schlussstück eines Magneten verwendet. Nachdem der erwartete Erfolg bei Anlegen und Wegnehmen des Schlussstückes eintrat, ging er am 1. Oktober dazu über, den Versuch ohne Eisen zu erneuren, indem er durch die eine von zwei auf einen Holzblock isoliert aufgewundenen Drahtlängen von je 203 Fuss (63 m) Länge einen möglichst starken Strom aus einer Batterie von 100 Plattenpaaren schickte. Als auch hier die nunmehr nach einer anderen Seite als früher gerichtete Aufmerksamkeit eine bejahende Antwort erhielt, folgten die auf Grund seiner Vorstellungen noch fehlenden Variationen für die Kraftlinienänderungen im induzierten Stromkreis noch im Oktober nach; so die Induktion einer Spannungswelle in einer Drahtwickelung mittels Näherung und Entfernung eines permanenten Magneten, und schliesslich am 28. Oktober als Experimentum crucis die Erzeugung einer elektrischen Spannung zwischen Achse und Umfang einer zwischen den Polen eines Magneten gedrehten Kupferscheibe. Dieser Keim unserer heutigen Dynamos in Form einer sogenannten Unipolarmaschine bildete den entscheidenden Abschluss für die Entdeckung des Prinzips der Starkstromtechnik. Dass Faraday die spätere Bedeutung seiner Entdeckung einigermassen ahnte, geht aus folgender Stelle seiner Exp. Res. I, 83 hervor:

Nachdem ich durch die vorhin beschriebenen Mittel Elektrizität durch Magnetstäbe erhalten hatte, hoffte ich den Versuch des Herrn ARAGO (vgl. 19) zu einer neuen Elektrizitätsquelle zu machen, sowie imstande zu sein, mittels erdmagnetoelektrischer Induktion eine neue Elektrisiermaschine zu konstruieren.

Nachdem FARADAY bei seiner Gründlichkeit auch noch durch verschiedene Variationen der Versuchsanordnungen seine letzten Zweifel beseitigt hatte, formuliert er in einem Schreiben vom 29. November 1831 an seinen Freund R. PHILLIPS seine Entdeckung wie folgt:

Nun muss ich Ihnen den Kernpunkt von all diesem kurz angeben. Wenn der elektrische Strom durch einen von zwei parallelen Drähten geschickt wird, so verursacht er zuerst einen Strom in derselben[1]) Richtung durch den anderen, aber dieser induzierte Strom bleibt keinen Augenblick bestehen, trotzdem der induzierende Strom (von der Voltabatterie) andauert. Alles scheint ungeändert, ausgenommen, dass der Hauptstrom [Primärstrom] weiterfliesst. Aber wenn der Strom unterbrochen wird, dann entsteht ein Rückstrom in dem der Induktion unterworfenen Draht von ungefähr der gleichen Stärke und augenblicklichen Dauer, aber in der entgegengesetzten Richtung des zuerst gebildeten. Strömende Elektrizität übt daher eine induktive Wirkung wie gewöhnliche Elektrizität aus, welche jedoch besonderen Gesetzen unterworfen ist. Die Wirkungen sind ein Strom in derselben[1]) Richtung, wenn die Induktion hergestellt ist, ein umgekehrter Strom, wenn die Induktion aufhört und ein eigentümlicher Zustand in der Zwischenzeit.

Für den letzten Zustand, den wir heute als den eigentümlichen Zwangszustand des vom primären Strom erzeugten magnetischen Feldes bezeichnen, schlug er bald darauf die später wieder verlassene Bezeichnung „elektrotonischer" Zustand vor.

Ebenso originell wie seine Vorstellungs- und Experimentierweise war die Art der Abfassung seiner Publikationen, wie sie in den 30 Serien der „Experimental-Researches in Electricity" vorliegen und mit ihren fortlaufend numerierten knappen und sachlichen Artikeln einen wohlthuenden Eindruck der Unmittelbarkeit machen. Welche Fundgrube von wertvollen experimentellen Thatsachen über alle Gebiete der Elektrizitätslehre, von den in die Physiologie reichenden Untersuchungen über den Zitteraal (Serie XV) an bis zu seinen fundamentalen elektrochemischen Untersuchungen, daselbst aufgespeichert sind in Verbindung mit den tiefsten Vorstellungen über die Verknüpfung der verschiedenen Gebiete, davon hat man sich erst neuerdings seit Entwickelung der Elektrotechnik allgemeiner überzeugt, nachdem seine wesentlichen Anschauungen überall siegreich wieder durchgedrungen sind und seine bis vor kurzem als unwissenschaftlich verschrieenen Vorstellungen (vgl. z. B. das nebensächliche Abthun derselben gegenüber der WEBERschen Theorie bei HOPPE § 337), durch MAXWELLS mathematisches Genie unterstützt, zu der vorläufig vollendetsten Elektrizitätstheorie ausgebildet wurden.

Im Jahre 1791 als Sohn eines Grobschmiedes geboren, fühlte sich FARADAY aus seiner Stellung als Buchbindergeselle so zur Wissenschaft hingezogen, dass er in der etwas gedrückten Stellung als DAVYS Assistent und Diener mehrere Jahre aushielt, bis es ihm trotz mancherlei Anfeindungen und trotz der eifersüchtigen Gegnerschaft von seiten DAVYS gelang, in die Royal Institution aufgenommen und später DAVYS Nachfolger zu werden. Seine unvollkommene Vorbildung, namentlich auch in mathematischer Beziehung, lassen aber seine Leistungen nur noch grösser erscheinen. Er starb 1867.

Da jedoch die erste Serie, wie FARADAY selbst betont, nicht die chronologische Reihenfolge seiner Entdeckungen über die Induktion einhält, so

1) Ein später alsbald verbesserter Irrtum hinsichtlich der Richtung.

wurde die Geschichte dieses so wichtigen Ausgangspunktes unserer heutigen Starkstromtechnik etwas eingehender behandelt.

20. Weiterentwickelung des Induktionsprinzips.

Die richtige Erklärung des ARAGOschen Phänomens, auf Grund der in der Kupferscheibe durch das Schneiden von magnetischen Kraftlinien des permanenten Magneten erzeugten Wirbelströme, war das erste Nebenprodukt der Entdeckung FARADAYS (Exp. Res. I, 81—139). Die Möglichkeit, das Erdfeld zur Induzierung von Spannung zu benutzen, wurde gleichfalls von ihm experimentell nachgewiesen. Den weiteren Ausbau, welcher sich mehr auf das ihm weniger naheliegende Quantitative bezog, überliess er aber anderen Forschern und eine gewisse Vorahnung der späteren technischen Entwickelung zeigt der Artikel 159, in dem er sagt: „ich habe mehr dahin getrachtet, neue Thatsachen und neue Beziehungen der magneto-elektrischen Induktion zu enthüllen, als die Stärke der schon ermittelten zu erhöhen, in der Überzeugung, dass das letztere seine volle Entwickelung späterhin finden werde." In Anknüpfung an seine Entdeckung erfolgte die Konstruktion von „neuen elektromotorischen Batterien" (Magnetinduktoren) durch den Italiener DAL NEGRO und durch PIXII (1832) mit vor feststehenden Spulen rotierenden permanenten Magneten und später (1833) von RITCHIE und von SAXTON mit rotierenden Spulen und stehenden Magneten. Diese Spulenmaschinen führten zunächst zu einer erheblichen Spannungssteigerung gegenüber den nur Millivolt betragenden Spannungsdifferenzen bei FARADAYS rotierender Scheibe, oder einer anderen Anordnung der sogenannten unipolaren Induktion, gleichzeitig aber auch, bis zur Erfindung des Kommutators, notwendig zu dem Übergang von der gleichgerichteten Spannung zu der wechselnden Induktion in den Drahtspulen, d. h. den Wechselstrommaschinen. (Über die weitere Entwickelung dieses ins Technische hinüberführenden Zweiges vgl. Band III und IV, Geschichtliches über Dynamos).

Eine nähere Untersuchung der Induktionserscheinungen, namentlich nach der quantitativen Seite, erfolgte vom Jahre 1834 an durch LENZ, der zunächst dem Induktionsgesetz eine auf das Prinzip von Wirkung und Gegenwirkung zurückgeführte Fassung gab. Bei seinen weiteren Forschungen, die FARADAYS Untersuchungen teils bestätigten, teils erweiterten, fand er die Proportionalität der induzierten Spannung mit der sekundären Windungszahl, ihre Unabhängigkeit von der Windungsweite bei gleichbleibender Länge des primären und sekundären Drahtes, die Unabhängigkeit von der Stelle der sekundären Spule auf dem eisernen Anker, die Unabhängigkeit von der Drahtdicke — vom Drahtmaterial hatte es bereits FARADAY nachgewiesen —. Zusammen mit JACOBI wurde 1839 noch von LENZ die mit dem verschwindenden oder entstehenden Magnetismus vorhandene Proportionalität der Integralspannung nachgewiesen.

Der bei Unterbrechung eines Stromkreises mit vielen Windungen erhaltene Schlag liess 1834 JENKINS und MASSON die Erscheinung der Selbstinduktion entdecken. Da sie aber selbst damit nicht viel anzufangen wussten, so übernahm FARADAY die Untersuchung über „die Induktion eines elektrischen Stromes auf sich selbst" (vgl. Exp. Res. IX) und vermochte nach vielfältiger Variierung diesen wichtigen Spezialfall der Induktion mit Hülfe seiner Kraftlinienvorstellung zu erklären (1834—1835). Berücksichtigt man die damals etwas abweichende Bezeichnungsweise der elektrischen Grössen, wonach Intensität soviel als Spannung bedeutete, so enthält folgender, auf jene Unter-

suchungen bezügliche Satz eines Briefes von FARADAY an PHILLIPS (1834) eine Art Vorahnung des Prinzips unserer heutigen Transformatoren:

Es ist jedenfalls sehr interessant zu sehen, wie ein elektrischer Strom von sehr geringer Intensität schliesslich einen entgegengesetzten (sekundären) Strom hervorruft, dessen Intensität seine eigene wahrscheinlich um das Hundertfache übertrifft, und dieser Versuch stellt eins der sehr wenigen Mittel dar, über die wir gebieten können, um Quantität strömender Elektrizität in Intensität zu verwandeln.

Diese Bemerkung besitzt auch bezüglich Bezeichnungsweise und Auffassung der heutigen „Energetik" ein gewisses Interesse.

Den aus der Selbstinduktionsspannung resultierenden elektrischen Ausgleich bezeichnet FARADAY als „Extrastrom" der Öffnung und der Schliessung, während JACOBI und LENZ (1838) die Bezeichnung Neben- bezw. Gegenstrom vorschlagen. Das der Wirkung nach eigentlich schon längst bekannte Eintreten von Induktionsströmen in benachbarten Leiterkreisen bei Entladung elektrostatisch gespannter Elektrizitätsmengen (vgl. **9**) wurde nunmehr auch besser verstanden und von RIESS (1838) nochmals daraufhin untersucht, wobei er mit Hülfe seines Luftthermometers die Proportionalität zwischen „Hauptstrom" (Primärstrom) und „Nebenstrom" (Sekundärstrom), d. h. bei ungeänderten Widerständen auch diejenige der Spannungen auffand. Untersuchungen von EDLUND mittels Galvanometers (1849) über die quantitativen Verhältnisse der Extraströme lieferten die beiden Sätze: „Die Intensität des Öffnungs- und Schliessungsstromes ist gleich gross" und „die Intensität der Extraströme ist derjenigen der induzierenden Ströme direkt proportional."

Auf Grund der Untersuchungen von HELMHOLTZ (1851) über den Verlauf der Spannungs- bezw. Stromkurve, welche beim Öffnen viel spitzer verlaufen und einen weit höheren Maximalwert aufweisen als beim Schliessen, sind jene beiden Sätze aber nur alsdann richtig, wenn hier unter Intensität der vom Galvanometer angezeigte Integralwert verstanden wird. Wir würden also deutlicher sagen: die in Bewegung gesetzten Elektrizitätsmengen sind unter sonst gleichbleibenden Verhältnissen in beiden Fällen gleich gross. Die Untersuchungen von HENRY (1840) über die Induktionsströme höherer Ordnung lieferten im wesentlichen nur den Beweis, dass die induzierten Grössen an Spannung und Strom sich dem Wesen nach gleichwertig verhalten mit den primären, d. h. weiterhin zur Induktion befähigt sind.

21. Faradays Auffassung der dielektrischen Vorgänge.

Schliesst man die mit jeder Spannungserregung untrennbar verknüpften dielektrischen Vorgänge hier an, so sind die Entdeckungen und Forschungen auf diesem Gebiet fast allein auf FARADAYS Arbeiten beschränkt. Zwar waren für die dielektrischen Vorgänge wichtige Beobachtungen bereits früher von CAVENDISH gemacht worden (vgl. **7**), ja eigentlich noch früher durch MUSHENBROCK, WILKE und CUTHBERTSON, welche die Abhängigkeit der Ladung bei gleichdimensionierten Leydener Flaschen von der Glassorte konstatierten, doch blieben dieselben ohne Folgen. Die Erklärung hierfür dürfte in dem Umstand zu suchen sein, dass die durch COULOMB und seine mathematischen Nachfolger angeregte Auffassung, wonach die elektrostatischen Erscheinungen auf unvermittelte Fernwirkung zurückzuführen sind, durchaus die herrschende war und trotz FARADAY auch noch sehr lange blieb. FARADAY, von dieser mit dem Mangel jeder Vorstellung behafteten Auffassung unbefriedigt, wurde auch auf diesem Gebiete ein Bahnbrecher, dessen Vorstellungen in neuester Zeit ziemlich allgemein durchdrangen und den Umsturz der Fernwirkungstheorie vollzogen.

1168. Eine andere mich stets beschäftigende Frage war die, ob Elektrizität eine reale und selbständige Existenz als ein Fluidum oder als zwei Fluida habe, oder ob sie blos eine der Materie innewohnende Kraft sei, wie wir die Gravitationsanziehung auffassen.

Durch die grösstmögliche Variierung der Versuchsanordnungen (vgl. Exp. Res. XI) überzeugte er sich von der Thatsache, dass keine absolute, sondern stets nur relative elektrische Ladung möglich sei. Namentlich brachte ihn auch die Entdeckung, dass Elektrolyte bei ihrem Festwerden in Isolatoren übergehen (z. B. Wasser und Eis) immer mehr zu einer einheitlichen Auffassung unter Aufgabe der Vorstellung von den zwei Fluida.

Da alsdann der Zustand des Zwischenmediums für die elektrostatische Induktion von der grössten Wichtigkeit, wenn nicht allein ausschlaggebend sein musste, so schritt er zur Untersuchung dieses Einflusses. Als entscheidendes Kriterium zwischen der Fernwirkungstheorie und seiner sich neu ausbildenden Vorstellung des „Prozesses der successiven Polarisierung" des „Dielektrikums", wie er „diejenige Substanz, durch welche hindurch die elektrischen Kräfte wirken", bezeichnete, sah er den Verlauf der elektrostatischen Induktionslinien an. Als er die Induktion in krummen Linien mit Hülfe einer besonders gebauten COULOMBschen Wage (vgl. Exp. Res. XI, 1215 u. ff.) überzeugend nachgewiesen hatte, schritt er zur Untersuchung des Einflusses des Materials der Zwischenschicht, um womöglich Unterschiede in der „spezifischen Induktionskapazität" zu finden. Zu seiner eigenen Überraschung fand er dieselbe für Schellack, Glas und Schwefel beträchtlich grösser als bei Luft und bestimmte so die ersten Dielektrizitätskonstanten, welche später (vgl. **119** bis **122**) teils nach ähnlichen Kapazitätsmethoden, teils durch Messung der anziehenden Kräfte vielfach Gegenstand der Untersuchungen wurden, namentlich als sie für die spätere elektromagnetische Lichttheorie durch ihr Verhältnis zu den Brechungsexponenten eine so wichtige Bedeutung erlangten. Ebenso stellte er fest, dass bei seiner Versuchsanordnung eine merkbare Abweichung dieser Grösse von der auf Luft bezüglichen Grösse weder bei beliebiger Verdünnung der letzteren, noch bei anderen Gasen vorlag. Auch ist seine Erklärung der Rückstandserscheinungen bei festen, eine Zeit lang elektrostatischen Druckdifferenzen ausgesetzten Isolatoren als eine sehr beschränkte Leitfähigkeit derselben (Art. 1245) höchst beachtenswert.

Anschliessend an die „spezifische Induktionskapazität" verschiedener Materialien ist ihre spezifische Widerstandsfähigkeit oder dielektrische Festigkeit von Bedeutung, da durch sie der Übergang von den elektrostatischen Ladeerscheinungen zu den Ausgleicherscheinungen unter Durchbrechung des Dielektrikums bedingt wird.

Die von RIESS auf Grund seiner Versuche (vgl. RIESS, Reibungselektrizität II, Seite 79) aufgestellte Formel für die Schlagweite, welche die Grenze der Festigkeit, gleichsam die Bruchfestigkeit des Dielektrikums, misst, drückt nur die Proportionalität zwischen Schlagweite d und der elektrischen Spannung oder Dichte

$$\frac{q}{s} = \frac{\text{Elektrizitätsmenge}}{\text{Flaschenzahl der Batterie}}$$

bei sonst gleichen Verhältnissen — letztere zusammengefasst in dem Koeffizienten b — aus, also

$$d = b \cdot \frac{q}{s}.$$

Als erstes Resultat von FARADAYS Untersuchungen im Jahre 1838 (Art. 1365 u. ff.) ergab sich die Proportionalität von Luftdichte und erforderlicher Spannung, d. h. bei gegebener Spannung ist die „die Entladung hindernde Kraft“ oder die dielektrische Festigkeit durch das Produkt von Luftstrecke und Dichte bestimmt. Unter Ausscheidung der durch die Wärme bewirkten Verdünnung ergab sich kein merklicher Temperaturkoeffizient der Festigkeit (1367). Die von ihm geäusserte Ansicht (1369), dass die Summe der elektrostatischen Druckkräfte in jedem vollen Querschnitt, gemessen durch die Anzahl der elektrostatischen Induktionslinien, konstant sei, ist als richtige Kreislaufvorstellung höchst beachtenswert, namentlich wegen der Analogie mit dem magnetischen Ausgleichgesetz (vgl. **110** u. **113**). Nach dem Einfluss der Form der das Dielektrikum begrenzenden Leiterenden, ob Spitze, Platte, kleine oder grosse Kugel, zu schliessen, ergab sich die Abhängigkeit des Durchbruchs von der spezifisch am stärksten beanspruchten Stelle im Querschnitt des Dielektrikums. Unter Berücksichtigung des letzteren Umstandes stellte FARADAY bei gleicher Spannung vergleichbare Werte zwischen verschiedenen Gasen auf, wobei Wasserstoffgas die geringste Festigkeit, d. h. unter sonst gleichen Verhältnissen die grösste Schlagweite gab (Exp. Res. XII, 1388 und XIII, 1507). Die verschiedene Wertigkeit des positiven und negativen Poles, bei Verwendung verschieden grosser Kugeln als Enden, wurde gleichfalls aufgefunden. So ergab sich z. B. bei Luft die „die Entladung hindernde Kraft“ am negativ geladenen Ende als kleiner, d. h. die dielektrische Durchlässigkeit als grösser (1501).

22. **Entladungserscheinungen bei Reibungselektrizität.**

Eine erhebliche Erweiterung gegenüber der vorausgegangenen Periode brachte die Entdeckung OERSTEDTS dem Forschungsgebiet der elektrischen Ausgleicherscheinungen. Namentlich veranlasste diese Erweiterung eine charakteristische Wendung in der Erkenntnis dieser Vorgänge von der bisher — mit Ausnahme der Arbeiten COULOMBS — fast rein qualitativen zur quantitativen Seite. Auf der einen Seite werden hierdurch die wichtigsten Fundamente für den wissenschaftlichen Ausbau des Gebietes gelegt und für die spätere technische Entwickelung die unerlässlichen quantitativen Handhaben gewonnen, auf der anderen Seite die mathematischen Ansatzpunkte für die sich alsbald üppig entfaltenden Behandlungen der theoretischen Elektrophysik geliefert. Da die letzteren für die Technik ein vielfach nur beschränktes Interesse besitzen und abgesehen von den zahlreichen, der Mathematik zu gute kommenden Anregungen zum Teil einen überwundenen Standpunkt darstellen, in ihren bleibenden Ergebnissen im übrigen gesondert im letzten Abschnitt des Bandes bearbeitet sind, so wird das Schwergewicht hier auf jene für Technik und mathematisch-theoretische Entwickelungen gemeinschaftlichen Fundamente zu legen sein.

Die Ausgleicherscheinungen bei der Entladung begrenzter Mengen von gespannter Reibungselektrizität erfahren auch in dieser Periode noch eingehendere Untersuchungen zum Zweck der Behebung der letzten Zweifel über die Wesensgleichheit aller elektrischen Strömungsvorgänge. So wurde das Magnetisierungsvermögen der Funkenentladung von ARAGO (November 1820), DAVY, sowie wahrscheinlich schon vorher von YELIN in München (vgl. HOPPE § 166) nachgewiesen. Die verschiedenen Arten der Entladungsformen bei hochgespannter Reibungselektrizität wurden namentlich von FARADAY eingehend untersucht, Erscheinungen, welche neuerdings auf technischem Gebiete wiederum erneutes Interesse gewinnen wegen der Energieverluste

durch sogenannte stille Entladungen zwischen den Leitungen bei sehr hoch gespannten Wechselströmen (vgl. **130**). Indem FARADAY zunächst an MARUMS Versuche (vgl. **5**) anknüpfte und dieselben wiederholte, stellte er weiterhin die Bedingungen und Erscheinungen der verschiedenen Entladungsformen fest; er unterscheidet die disruptiven Entladungen in einmalige Funken und intermittierende, durch den Ton in der sekundlichen Anzahl gekennzeichnete Büschelentladungen; ferner die kontinuierlichen in das vom elektrischen Wind begleitete Glimmlicht und die dunkle Entladung, und bringt die durch Erzeugung eines Konvektionsstromes eintretende Entladung durch Fortführung in Verbindung mit der elektrolytischen Leitung (Exp. Res. XII u. XIII 1838). Die scheinbar momentan erfolgende Entladung durch den Funken wurde von WHEATSTONE (1834) einer näheren Untersuchung unterzogen, wobei es mit Hülfe eines schnell rotierenden Spiegels zunächst gelang die Dauer der Entladungsfunken nachzuweisen und in einem Falle zu etwa 0,000042 Sekunden zu bestimmen. Weiterhin gelang es ihm mit dem demselben Hülfsmittel die Grössenordnung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit in einem 805 m langen Draht zu ermitteln, wobei er 62 500 Meilen — also etwa um $^1/_3$ zu gross — in der Sekunde fand. Bei spektroskopischer Untersuchung des Funkens fand er (1835) das Spektrum wesentlich abhängig von den die Funkenstrecke begrenzenden Körpern, als Beweis dafür, dass von beiden Seiten glühende Teilchen mitgeführt werden. Der meist oscillatorische Charakter der Entladungsfunken wurde jedoch erst nach Schluss dieser Periode von FEDDERSEN (1861) nachgewiesen und genauer untersucht (vgl. **35**).

23. Magnetische Wirkung galvanischer Ströme.

Von ungleich grösserer Bedeutung war in dieser Periode die Erforschung der Ausgleicherscheinungen bei aufrecht erhaltener Spannung, d. h. des mehr oder weniger konstanten Gleichstromes. Wie bereits in **17** erwähnt, wurde durch OERSTEDTS Entdeckung die Aufmerksamkeit zunächst allen Erscheinungen der Feldwirkung des elektrischen Stromes zugewendet. In Ergänzung der dortigen Ausführungen ist zunächst die Klärung der Anschauungen über die Strömungsvorgänge bei geschlossener Voltasäule durch die ersten Arbeiten (18. September 1820) von AMPÈRE (geb. 1775 zu Lyon, gest. 1836 zu Paris) zu erwähnen. Bleibend waren hiervon: die ausdrückliche Unterscheidung von Spannung und Strom unter Einführung dieser letzteren, später allgemein angenommenen Bezeichnung für den elektrischen Ausgleich, ferner die Bezeichnung der durch Anwendung der Magnetnadel charakterisierten Messvorrichtung als Galvanometer, sowie der mit ihm, d. h. durch die Ablenkung der Nadel ausgeführte Nachweis, dass innerhalb der Säule gerade so wie im „Schliessungsdraht“ jener als Strom bezeichnete Zustand vorhanden ist. Die von OERSTEDT angegebene Merkregel für die Ablenkung der Nadel wurde durch AMPÈRES Schwimmregel verdrängt, sowie die jetzt geltende Stromrichtung — im äusseren Kreis vom positiven zum negativen Pol — von ihm vorgeschlagen. Etwas völlig Neues war die Entdeckung der ponderomotorischen Beeinflussung zweier Batterieschliessungsdrähte. Die daraus gefolgerte Ersetzbarkeit der Magnetnadel durch einen stromdurchflossenen Leiter (25. September 1820) lieferte gleichsam den Beweis, dass Magnetismus auch ohne permanente Magnete nur durch strömende Elektrizität hervorgerufen wird und bahnte die heutige Auffassung der Feldwirkung des Stromes als Ausgangs- und Grunderscheinung des ganzen Gebietes an. Namentlich fiel damals die gänzliche Verschiedenheit, ja scheinbare Gegensätzlichkeit der Anziehungs- und Abstossungserscheinungen bei durchströmten Leitern gegenüber

elektrostatisch geladenen Leitern auf, nämlich die Anziehung gleichgerichteter Ströme, die Abstossung entgegengesetzter. Die in derselben Sitzung der Pariser Akademie von Arago mitgeteilte Entdeckung, dass von dem stromdurchflossenen Leiter (Schliessungsdraht) Eisenfeilspäne gerade so angezogen würden wie von einem (permanenten) Magneten, bildete den Ausgangspunkt des Elektromagnetismus. Die Beschränkung auf Eisenfeilspäne, d. h. das Nichtvorhandensein einer Anziehung bei Kupfer- und Messingspänen, das an die Stromdauer gebundene Vorhandensein des Magnetismus bei weichem Eisen und die dauernde Magnetisierung einer Stahlnadel (Nähnadel), waren unmittelbar anschliessende Entdeckungen; ebenso die auf Grund von Ampères Theorie der Magnete (vgl. **30**) vorgeschlagene Steigerung der Wirkung durch Führung des Schliessungsdrahtes in Spiralform, sowie die gegensätzliche Wirkung der Rechts- und Linksspirale. Eine weitere Frucht seiner theoretischen Vorstellungen war die Ersetzung des permanenten Magneten durch das Erdfeld, d. h. der experimentelle Nachweis des durch das Erdfeld auf stromdurchflossene Windungen ausgeübten Antriebes (9. Oktober 1820). Um die Wirkung des Erdfeldes zu eliminieren und die „richtende" Kraft zwischen Strom und Magnet rein zur Wirkung kommen zu lassen, erfand er zunächst die astatische Inklinationsnadel, d. h. ein Galvanometer, bei welchem die Achse der Magnetnadel in Richtung der Inklination gebracht wurde, und ein Jahr später (1821) auch die astatische Doppelnadel. Biot und Savart führten diese Kompensation des Erdfeldes bei einer an langem Kokonfaden aufgehängten Magnetnadel durch einen in der Nachbarschaft angebrachten festen Magneten aus und untersuchten alsdann die Wechselwirkung zwischen einem geradlinigen Strom und jenem nahezu freien Magnetpol. Aus ihren experimentellen Beobachtungen leitete Biot durch eine einfache mathematische Betrachtung das nach jenen beiden Forschern benannte wichtige Gesetz ab, welches Qualität und Quantität der Kraftwirkung eines festen geradlinig unbegrenzten Stromes auf einen beweglichen Magnetpol angiebt: „Die auf einen Magnetpol wirkende Kraft ist senkrecht auf dem vom Magnetpol auf den Strom gefällten Lote und senkrecht auf dem Strome, d. h. senkrecht auf der durch den Strom und den Magnetpol bestimmten Ebene. Die Intensität der Kraft (f) ist umgekehrt proportional der Distanz (l) des Poles (m) von dem Strom (I)." Dieses Kraftwirkungsgesetz $f = \frac{I \cdot m}{l}$, welches zwischen dem linienförmigen Leiterstrom und dem punktförmigen Magnetpol besteht, enthält also die einfache Entfernung im Nenner. Es bildet als „Liniengesetz" eine wichtige Ergänzung zu dem „Punktgesetz" Coulombs, welches analog dem Gravitationsgesetz Newtons das Quadrat der Entfernung enthält (vgl. **7** und **134**) und sich auf zwei punktförmige Magnetpole oder elektrische Ladungen bezieht. Gleichzeitig stellt es eine der wichtigsten grundlegenden Quantitätsbeziehungen auf elektromagnetischem Gebiete dar, deren Aufdeckung für die wissenschaftliche Weiterentwickelung von grösstem Einfluss blieb. Durch Untersuchungen von Boisgiraud mit einer schwimmenden Magnetnadel erfuhr dies Gesetz bald darauf (9. November 1820) eine weitere — allerdings zunächst unerkannte — experimentelle Bestätigung. Die von anderen Forschern sogleich aufgenommenen Experimente Aragos mit den Eisenfeilspänen liessen Davy die Unterschiede ihrer kreisförmigen Anordnung um den Leiter gegenüber derjenigen in krummen divergierenden Linien um den Magnetpol beobachten. Wie es scheint wurde hierdurch auch Faraday zu seiner frucht-

baren Vorstellung der magnetischen Kraftlinien angeregt, zu deren Sichtbarmachung ja die Anwendung von Eisenfeilspänen noch heute allenthalben gebräuchlich ist. Weitere Untersuchungen über die Wechselbeziehungen zwischen Magnet und Strom führten DAVY (1821) zur Ablenkung des Lichtbogens durch den Magneten, welche von ihm sowohl in Gestalt einer Ausbiegung, sowie — bei entsprechender Bewegung des Magnets — einer Rotation des Lichtbogens gezeigt wurde (1822). Wenn diese Thatsache zu der Meinung geführt hat, dass DAVY den dauernden Lichtbogen zwischen weichen Kohlenstücken zuerst hergestellt und damit den Ausgangspunkt zu der Bogenlampenbeleuchtung geliefert habe, so scheint dieser Schluss ungerechtfertigt zu sein, da es nachgewiesen ist, dass DE LA RIVE bereits (1820) den dauernden Lichtbogen unter Anwendung von 380 Elementen aus Kupfer, Zink und verdünnter Schwefelsäure sowohl in der Luft, als zum Zeichen seiner Unabhängigkeit vom Sauerstoff im luftleeren Raum, vorgeführt hat (vgl. HOPPE §§ 162 u. 362. Weiteres siehe in Bd. VIII). Allerdings mag DAVY um die Ausbildung Verdienste besitzen, namentlich durch Steigerung der Länge des „Flammenbogens“ oder der „Säule elektrischen Lichtes“, welchem bei obigem Versuch, mit einer Voltabatterie von 2000 Zink-Kupferelementen hergestellt, eine Länge von 1 bis 4 Zoll (2·5 bis 10 cm) gegeben werden konnte, doch scheint der Übergang von der Funkenerzeugung mit Hydroketten zum Dauerbogen an keinen bestimmten Namen knüpfbar zu sein.

Klarer liegen die Verhältnisse bezüglich der Erzeugung der Dauererscheinung von elektromagnetischen Rotationsvorrichtungen. Angeregt durch die Untersuchungen der Pariser Forscher wurden vielerorts dahin zielende Versuche gemacht. So bemühte sich in London WOLLASTON vergeblich eine solche zu erzielen, bis es FARADAY gelang diese ihm damals mit Unrecht bestrittene, ja ihm sogar als entlehnt vorgeworfene Erfindung zu machen. Der experimentelle Nachweis der dauernden Wechselwirkung zwischen Magnet und Strom wurde von FARADAY in beiden Formen, d. i. dem um den festen Magnet kreisenden Stromleiter und dem um den festen Stromlauf kreisenden Magnet ausgeführt und dadurch die ersten elektromagnetischen Rotationsapparate geschaffen (11. September 1821). Durch diese Erfolge angespornt wurde AMPÈRE zu weiteren Arbeiten auf diesem Gebiete veranlasst, die schliesslich eine weitere Klärung seiner Anschauungen herbeiführten, deren Frucht im Jahre 1822 und 1823 ausreifte, einerseits in Gestalt seiner endgiltigen Vorstellung (Theorie) über die permanenten Magnete, andererseits in der als AMPÈREsches Gesetz bekannten wichtigen Formulierung aller sogenannten „elektrodynamischen“ Phänomene. Diese gesetzmässige Formulierung der Kraftwirkungen (df) zwischen zwei beliebigen Leiterelementen ds und ds', welche von den Stromstärken i bezw. i' durchflossen werden, ist durch die Gleichung dargestellt:

$$df = \frac{1}{2}\, i \cdot i' \cdot ds \cdot ds' \cdot \frac{(2 \cos \varepsilon - 3 \cos \vartheta \cdot \cos \vartheta')}{l^2},$$

wenn l den Abstand der Leiterelemente, ϑ bezw. ϑ' ihre Winkel mit l, sowie ε ihren sogenannten räumlichen Winkel bezeichnet. AMPÈRE lieferte hierdurch die quantitative Seite zu seinem bereits 1820 gefundenen qualitativen Grundgesetz über die Anziehung und Abstossung zwischen Stromleitern und damit ein weiteres Fundament für den wissenschaftlichen Ausbau (vgl. **22**).

24. Elektrische Ausgleichgesetze. Ohms Arbeiten.

Dass der eintretende elektrische Ausgleich bei derselben Stromquelle, zunächst Primärelement bezw. Batterie, je nach den Verhältnissen des Schliessungskreises Verschiedenheiten aufwies, hatte man natürlich schon frühzeitig an der Stärke der Gasentwickelung bei eingeschalteter Zersetzungszelle, der Erwärmung von Leiterstrecken, sowie nach OERSTEDTS Entdeckung an dem verschieden grossen Ausschlag der als Galvanometer dienenden Magnetnadel erkannt. Mehrere Jahre blieben jedoch die Bemühungen einen gesetzmässigen Zusammenhang zu finden, der allgemeinere Gültigkeit beanspruchen konnte, erfolglos. Man stösst in den Berichten über die Untersuchungen der Ausgleichvorgänge auf viele Beobachtungen, welche die Abhängigkeit des Stromes teils von der Variation der Grössenverhältnisse der Batterie, teils von der Variation der Dimensionen und des Materials im äusseren Stromkeis ausdrücken oder auszudrücken versuchen, ohne jedoch den tieferen Zusammenhang aufdecken zu können. Bei dem langsamen Bekanntwerden der von OHM herbeigeführten umfassenden Lösung dieser Frage nach dem Zusammenhang der wichtigsten Ausgleichgrössen erstrecken sich die fruchtlosen bezw. unnötigen Untersuchungen nach dieser Richtung noch weit über das Jahr 1830 hinaus. Hierfür können viele bei Kenntnis von OHMS Leistungen vermeidbare, mühevolle Versuchsvariationen FARADAYS bis zum Jahr 1837 als Beispiel angeführt werden. Unter den wenigstens teilweise erfolgreichen Untersuchungen über die Abhängigkeit des elektrischen Ausgleichs von den Verhältnissen des äusseren Schliessungsweges sind DAVYS Arbeiten über das Leitvermögen von Drähten (1822) zu erwähnen. Neben einigen Ergebnissen mehr qualitativen Charakters, wie Abnahme des Leitungsvermögens bei steigender Temperatur, grössere Wärmeentwickelung bei gleichdimensionierten schlechteren Leitern (Aufglühen der Platindrahtstücke in einer aus gleich starken Silber- und Platindrahtstücken zusammengesetzten Drahtleitung) bildet das Hauptergebnis die Abhängigkeit des gesamten Leitungsvermögens eines Drahtes von seinen Dimensionen. Durch Deformationen (Auswalzen oder dergleichen) derselben Menge Leitermaterial fand er das Leitungsvermögen unabhängig von der Oberfläche, dagegen direkt proportional dem Querschnitt und umgekehrt proportional der Länge. Gestützt auf dieses Ergebnis stellte er alsdann folgende mit Ausnahme der Stellung von Blei im wesentlichen richtige Reihe für das spezifische Leitvermögen auf: Eisen, Palladium, Platin, Zinn, Zink, Gold, Blei, Kupfer, Silber. Ähnliche Untersuchungen über die Leitungsfähigkeit der Metalle bildeten den Ausgangspunkt bei OHMS epochebildenden Arbeiten, welche den fundamentalen Zusammenhang zwischen den drei physikalischen Hauptgrössen der strömenden Elektrizität und damit die wichtigste Beziehung für die heutige Starkstromtechnik aufdeckten.

GEORG SIMON OHM, geboren 1789 in Erlangen als Sohn eines Schlossermeisters, bezog nach Absolvierung des Gymnasiums bereits mit 16 Jahren die Universität seiner Vaterstadt, wo er sich 1811 als Privatdozent habilitierte, jedoch von der damals blühenden, den exakten Untersuchungen feindlichen Naturphilosophie abgestossen, als Lehrer nach Bamberg und 1817 nach Köln übersiedelte, wo er seine bedeutenden Arbeiten in den Jahren 1825 bis 1827 veröffentlichte. Diese von der herrschenden naturphilosophischen Richtung in ihrer Bedeutung verkannten Arbeiten erfuhren, mit Ausnahme FECHNERS und POGGENDORFS, eine sehr abfällige Kritik, wodurch die allgemeinere Verbreitung ihrer Ergebnisse gehemmt und OHM das Dasein verbittert wurde, der inzwischen eine Lehrerstelle am Nürnberger Polytechnikum angenommen

hatte. Erst ziemlich spät wurde OHM die gebührende Anerkennung, so 1841 durch Verleihung der COPLEY-Medaille der Royal Society und 1849 durch Berufung als Professor nach München, wo er fünf Jahre später (1854) starb.

Seine erste Arbeit, 1825 in SCHWEIGGERS Journal (Bd. 44, 110) und POGGENDORFS Annalen (Bd. 4, 79) erschienen, bezeichnet die Versuchsanordnung und die erste Versuchsreihe mit folgenden Worten:

„Zu den Versuchen selbst gebrauchte ich einen Kupfer-Zink-Trog von 13 Zoll Höhe und 16 Zoll Länge. Aus dem Zink ging ein Draht A in ein Gefäss mit Quecksilber M, aus dem Kupfer ein Draht B in ein Quecksilbergefäss N; ferner wurde ein Draht C aus dem Gefäss M in ein drittes O geleitet. Der Kürze halber werde ich die Drähte A, B, C zusammengenommen den unveränderlichen Leiter nennen. Ausser diesen hatte ich noch sechs andere o, a, b, c, d, e, deren Längen respektive $^1/_3$, 1, 3, 6, $10^1/_3$, 23 Fuss betrugen und die dazu dienten, die Gefässe N und O miteinander zu verbinden und so die Kette zu schliessen; ich werde sie veränderliche nennen. Diese veränderlichen Leiter, mit Ausnahme des Leiters o, der sehr dick war, hatten alle 0,3 Linien im Durchmesser. Über dem Teile O des unveränderlichen Leiters hing eine Magnetnadel in einer COULOMBschen Drehwage von besonderer Einrichtung, die der jedesmaligen Kraftbestimmung zum Massstab diente.

Erste Reihe von Versuchen.

„Der unveränderliche Leiter war 4 Fuss lang und $1^1/_4$ Linie dick. Die veränderlichen Leiter wurden in folgender Ordnung angewendet:

$$o\ a\ o\ b\ o\ c\ o\ d\ o\ e\ o$$

und jedesmal die Kraft des unveränderlichen Leiters auf die Magnetnadel gemessen. Aus vielen solchen Versuchsreihen ergaben sich folgende Mittelwerte für den Verlust an Kraft, welcher eintrat, wenn ein veränderlicher Leiter die Kette schloss.

Leiter	o	a	b	c	d	e
Kraftverlust beobachtet	0,00	0,12	0,25	0,35	0,43	0,58

Der Zahlenreihe liegt die Kraft des Leiters o, die ich Normalkraft nennen werde, als Einheit zu Grunde. Diese Normalkraft wurde an der Drehwage durch 150 Teile, deren 100 eine ganze Umdrehung ausmachen, angezeigt.

„Die Werte dieser Zahlenreihe lassen sich sehr genügend durch die Formel:

$$v = 0{,}41 \log (1 + x)$$

darstellen, wobei v den Kraftverlust und x die Länge des veränderlichen Leiters in Fussen anzeigt. Man erhält hieraus durch Rechnung:

Leiter	o	a	b	c	d	e
Kraftverlust berechnet	0,00	0,12	0,25	0,35	0,43	0,57

Nach mehrfacher Variation der Versuchsbedingungen leitete er alsdann das später als unrichtig erkannte Gesetz

$$v = m \log \left(1 + \frac{x}{a}\right)$$

ab, worin a eine „reduzierte Länge" des unveränderlichen Kreislaufwiderstandes darstellt. Trotz dieser anfänglich unrichtigen Formulierung, welche

in der grossen Inkonstanz der Hydrokette ihre Ursache hatte, verrät sein Vorgehen grosses Geschick. Hierfür spricht namentlich die Benutzung von OHMS Drehwage (vgl. Fig. 2) zur Stromstärkemessung an Stelle der anfangs allgemein üblichen unrichtigen Messung der Stromstärke durch den Galvanometer**ausschlag** (vgl. **28**). Diese Überführung der Strommessung in eine Messung der Torsionskraft eines Metallstreifens, der an Stelle von COULOMBS Torsionsdraht benutzt wurde, hat auch die Ausdrucksweise OHMS sowie einiger Nachfolger, z. B. FECHNERS bedingt. Anstatt Stromstärke ist meist kurzweg Kraft gesagt, daher an Stelle von Abnahme der Stromstärke: Kraftverlust und weiterhin auch von dem durch Polarisation verursachten „beständigen Wogen der Kraft“ gesprochen, also die zur Kompensation variable Torsionskraft an Stelle der wirksamen Spannung bezw. EMK gesetzt, welche bei konstanten Widerstandsverhältnissen mit der Stromstärke proportional ist.

Durch POGGENDORFS Anmerkung: „Es wäre zu wünschen, dass der Herr Verfasser Muse fände, diese und ähnliche Gesetzbestimmungen mit der sogenannten thermo-elektrischen Kette vorzunehmen. Die Wirkungen sind bei dieser bei weitem beständiger als bei der sogenannten hydro-elektrischen Kette, und lassen deshalb sehr scharfe Messungen zu“, veranlasst, nahm OHM (1826) eine Überprüfung mit Hülfe eines Thermoelementes vor. Diese einfache, aber für ihre Zeit auffallend einwurfsfreie Messvorrichtung stellt Fig. 2 (aus OSTWALD, Kap. XI, 6) dar, welche sich wohl von selbst erklärt, wenn man berücksichtigt, dass ab und $a'b'$, die beiden einerseits auf Wasserdampftemperatur, andererseits auf Schmelzenstemperatur gehaltenen Lötstellen zwischen dem rechtwinkligen Wismutstück und den nach cc' bezw. mm' führenden Kupferbügeln bedeuten. Die aus diesen Versuchen entspringende Erkenntnis der Mangelhaftigkeit seiner ersten Formulierung führte ihn einmal zu wertvollen Rückschlüssen über die Polarisation und die innere Widerstandsveränderung der Hydroketten, sowie zur Bestimmung des spezifischen Leitungsvermögens von Metallen; vor allen Dingen aber zu seiner zweiten, richtigen Formulierung des nach ihm benannten Gesetzes, welche auf Grund der gewonnenen Zahlenreihen mit folgenden Worten erfolgte:

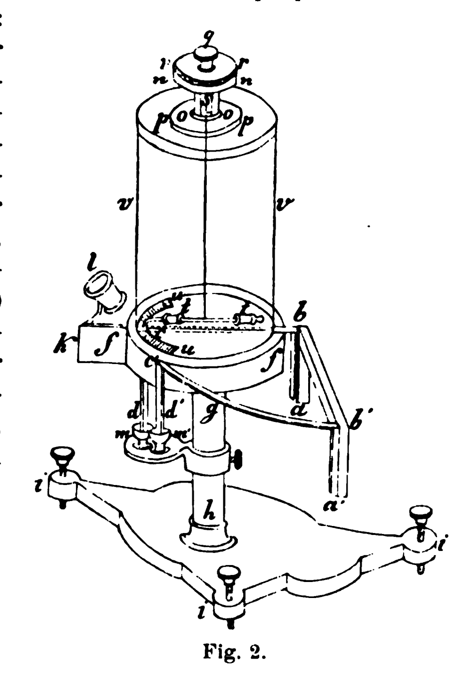


Fig. 2.

„Obige Zahlen lassen sich sehr genügend durch die Gleichung

$$X = \frac{a}{b + x}$$

darstellen, wenn X die Stärke der magnetischen Wirkung auf den Leiter, dessen Länge x ist, a und b aber konstante, von der erregenden Kraft und dem Leitungswiderstande der übrigen Teile der Kette abhängige Grössen bezeichnen.“

Die Richtigkeit der Formulierung erkennt man sofort, wenn man die uns heute geläufigeren Bezeichnungen und Symbole dafür einsetzt, das ist

hatte. Erst ziemlich spät … den inneren Widerst…d
durch Verleihung der …ssung, der damals von OHM
Berufung als Profe… …geschickt in Längeneinheiten
Seine erste …bei andere Querschnitte stets
POGGENDORFS A… wurden, so dass er mit „redu-
ordnung und … …iten rechnet. Weitere Folge-
…tigung der DAVYschen Resultate.
…ren Widerstandes b einer Stromquelle
…regel der Elemente für das Maximum
…ur das Maximum des Galvanometeraus-
…er Tagesordnung stehende Arbeiten auf
… im Messinstrument hat zwar heutzutage
…och hatten alle diese Beobachtungen den
…st unklaren und teilweise unrichtigen Vor-
…scheinungen zu klären, ein Wert, den sie bis
…ien im ähnlichen Entwickelungsstadium be-
…. OHM schliesst seinen Aufsatz:

„Zu den … und 16 Zoll … aus dem Ku… dem Gefä… zusamme… noch … trug… Kett… mi… …

…gen entworfenen Theorien der Säule und des Multipli- … als die Versuche selbst, aus denen sie geflossen sind, …handlung entwickelten Gesetzes der Leitung der Elektrizität … nach verschiedenartigsten Wirkungen der galvanischen Mannigfaltigkeit zu einem schönen Ganzen. SEEBECKS wich- … Faden zu spinnen, der aus dem Labyrinthe leitet, in das …verzweigt.

… richtige Würdigung dieser Leistung OHMS dürfte in …WALDS (vgl. Kap. XI, 6) enthalten sein:

… ung der elektroskopischen Kraft oder der Spannung als der …e Bewegung der Elektrizität, und die Einführung der Begriffe … der Zeiteinheit bewegten Elektrizitätsmenge, sowie des Wider- … Spannung unabhängigen Ursache, welche ausser dieser in einem … Stromstärke bestimmt, hatte er die Form gefunden, in welcher …en der galvanischen Kette am einfachsten „beschreiben“ liessen, … von Aufklärung, welche die in ihrer Gestalt so überaus einfache …eht in diesem Falle ganz besonders deutlich die ungeheuere Bedeu- … die angemessene Begriffsbildung für den Fortschritt der Wissenschaft … angemessenen Begriffe gefunden waren, hatte es überhaupt nicht ge- … galvanischen Erscheinungen eine zahlenmässige Gesetzlichkeit aus-

… Klärung brachte OHM im Jahre 1826 durch seinen in … Annalen erschienenen Aufsatz: „Versuch einer Theorie der … Kräfte hervorgebrachten elektroskopischen Erscheinungen.“ … die obige Beziehung OHMS vom ganzen Kreislauf auf die Unter- … übertragen und der Spannungsabfall proportional der Länge … Widerstande nachgewiesen unter ausdrücklicher Einführung der … Längen“ als Widerstandseinheiten. Diese Verallgemeinerung … Ausgleichbeziehung für stationären Gleichstrom führte auch zu … üblichen Fassung des OHMschen Gesetzes (POGG. Ann. 6, 459):

… ich die beiden, auf jede galvanische Kette gewöhnlicher Art anwend- …durch folgende zwei Gleichungen kurz so aussprechen:

$$X = kw \frac{a}{l} \quad \text{(a)}$$

$$u - c = \pm \frac{x}{l} a \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (b)$$

wobei k das Leitungsvermögen, l die Länge, w den Querschnitt eines homogenen, prismatischen Leiters, a die an seinen Enden hervortretende elektrische Spannung, und x die Länge eines Teiles des Leiters bezeichnet, der von einem in dem Leiter unveränderlich, übrigens willkürlich angenommenen Querschnitte, der zum Anfangspunkte der Abscissen gewählt worden ist, bis zu einem innerhalb des Leiters veränderlich gedachten Querschnitte reicht; ferner stellt X die auf der ganzen Länge des Leiters unveränderlich sich erhaltende Stärke des elektrischen Stromes und u die Intensität der auf das Elektrometer wirkenden, an der durch x bezeichneten Stelle befindlichen und mit ihr veränderlichen Elektrizität vor; endlich ist c eine durch gegebene Umstände noch zu bestimmende, von x unabhängige Grösse. Das doppelte Zeichen in der Gleichung (b) bestimmt sich danach, ob die Richtung der Abscissen von mehr — thätigen Stellen nach mehr + thätigen geht, oder ob umgekehrt.

2) Eine ganz einfache Zerlegung der Gleichung (a) führt zu besonderen Gesetzen, von denen ich folgende heraushebe:

I. Die Stärke des elektrischen Stromes bleibt in verschiedenen Leitern sich völlig gleich, wenn, bei gleicher Spannung an ihren Enden, ihre Längen sich verhalten wie die Produkte aus ihren Querschnitten in die ihnen eigentümlichen Leitungskoeffizienten, mithin
   a) bei gleicher Spannung und gleichem Leitungsvermögen, wenn ihre Längen sich verhalten wie ihre Querschnitte;
   b) bei gleicher Spannung und gleichem Querschnitt, wenn sich ihre Längen wie die Zahlen verhalten, durch welche ihre Leitungsgüte ausgedrückt wird.

II. Bei gleichem Leitungsvermögen und gleichem Querschnitt in verschiedenen Leitern richtet sich die Stärke des Stromes nach dem Quotienten, der gebildet wird aus der an den Enden eines jeden Leiters hervortretenden elektrischen Spannung und aus der Länge desselben Leiters.

Es hält nicht schwer mit Zuziehung der Gleichung (b) sich zu überzeugen, dass die in I ausgesprochenen Gesetze noch wahr bleiben, wenn anstatt der ganzen Leiter irgend beliebige Teile derselben betrachtet werden. Dadurch wird es möglich, für jeden Teil des homogenen und prismatischen Leiters einen anderen von gegebenem Leitungsvermögen und gegebenem Querschnitt zu setzen, der den elektrischen Strom in Nichts ändert, und umgekehrt jeden aus Teilen von verschiedenem Leitungsvermögen und verschiedenem Querschnitt bestehenden Leiter in einen anderen zu verwandeln, der in seiner ganzen Länge einerlei Leitungsvermögen und einerlei Querschnitt hat, wenn man nur jenem Gesetz gemäss ihre Längen sich verändert denkt. Auf solche Weise ist es erlaubt, die Gleichung (a) in folgende einfachere

$$X = \frac{a}{l} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (c)$$

umzuändern, wobei bloss zu bemerken ist, dass jede Länge eines Leiters oder Teil des Leiters, dessen Leitungsvermögen oder Querschnitt von den zur Norm gewählten abweicht, zuvor erst nach dem Gesetze I reduziert gedacht werden müsse. Die so gedachten Längen werde ich in der Folge deshalb reduzierte Längen nennen.

Ohms zusammenfassendes Hauptwerk erschien 1827 in Berlin in Buchform, betitelt: „die galvanische Kette mathematisch bearbeitet".

Die Erbitterung der Naturphilosophen gegen das vermutlich unberechtigte Eindringen der Mathematik in die Physik fand in der absprechenden Kritik des Physikers Pohl ihren Ausdruck. Diese Schädigung der Wissenschaft durch die damals noch herrschende Naturphilosophie, wie sie sich hier in der Unterdrückung der Leistungen Ohms darstellt, verhinderte jedoch nicht eine wohlthuende sachliche Überprüfung und Anerkennung der Ohmschen Arbeiten durch Fechner, welcher in seiner 1831 erschienenen Schrift (Massbestimmungen über die galvanische Kette) urteilt:

Die Theorie, von welcher ich spreche, ist die Ohmsche. Die Gesamtheit meiner Versuche kann gar keinen Zweifel übrig lassen, dass die allgemeine Form der Formel,

die sie für die Kraft der geschlossenen Kette aufstellt, die richtige sei, und ich kann demgemäss nicht umhin, OHM das Verdienst beizumessen, mit den wenigen Buchstaben dieser einfachen Formel eine neue Epoche für die Lehre vom Galvanismus begründet zu haben. Sie lehrt allerdings keine neuen Erscheinungen im Gebiete desselben kennen, aber sie verknüpft ein grosses Gebiet von Erscheinungen, die früher chaotisch und räthselhaft nebeneinander standen, und giebt sichere Anhaltspunkte für das Mass derselben; so dass jetzt erst eine wissenschaftliche Behandlung derselben möglich ist. Ich wünsche, dass meine Schrift dazu beitragen möge, dem Verdienste OHMS eine grössere Anerkennung, als es bisher der Fall gewesen ist, zu verschaffen.

Die Arbeit FECHNERS enthielt auch die nochmalige Bestätigung der in OHMS Gesetz stillschweigend vorhandenen Voraussetzung, dass die Stromstärke in allen Teilen des Stromkreises dieselbe sei. Diese Voraussetzung war zuerst von BARLOW für einen etwa 250 m langen äusseren Stromkreis mittels Galvanometers experimentell als richtig erwiesen worden. Ihre Gültigkeit auch innerhalb der Stromquellen wurde nochmals besonders von R. KOHLRAUSCH (1856) nachgewiesen.

Dass die weittragende Beziehung OHMS das wichtigste Fundament für den wissenschaftlichen Ausbau der Elektrophysik bildet, sodass von ihm das nachhaltige Einsetzen ihrer quantitativen Periode gezählt werden kann, hat erst die neuere Zeit voll erkannt. Bemerkenswert bleibt, dass OHM zunächst empirisch auf seine Beziehung geführt wurde und sich erst nachher bei der allgemeinen Ableitung an FOURIERS Theorie der Wärmeleitung anlehnte. Bis OHM waren zwar die Kraftwirkungen der mathematischen Behandlung zugänglich gemacht (vgl. **23**), nicht aber die rein elektrischen Grundbegriffe untereinander, wenn man auch Spannung und Elektrizitätsmenge, sowie Strom schon wohl zu unterscheiden gelernt hatte. Gegenüber dieser Leistung treten seine anderen Untersuchungsergebnisse, welche unter anderen auch DAVYS Beobachtung der Widerstandszunahme metallischer Leiter mit der Temperatur bestätigen, zurück.

Ein weiterer wesentlicher Fortschritt auf dem Gebiete der rein physikalischen Ausgleicherscheinungen wurde durch die mit der letzten Erscheinung in Verbindung stehenden Wärmewirkung des elektrischen Stromes herbeigeführt. Diese Seite der Stromwirkung wurde zunächst systematisch von RIESS mit Reibungselektrizität bei der Entladung von Leydener Flaschen oder Batterien untersucht (1837 und 1838, vgl. HOPPE § 251). Mit Hülfe des von ihm wesentlich verbesserten KINNERSLEYschen Luftthermometers (**6**) stellte er fest, dass die Temperaturerhöhung infolge der Entladung der Batterie proportional dem Produkt aus Elektrizitätsmenge und Dichtigkeit, oder auch (bei konstantem Ausgleichwiderstand) proportional dem Quadrat der Elektrizitätsmenge dividiert durch die Entladungszeit ist. Bezüglich der letzteren findet er, dass das Ende der Entladung durch Einschaltung eines Drahtes um eine Zeit verzögert wird, welche der Länge des Drahtes direkt, dem Querschnitt umgekehrt proportional ist, und die ferner noch von der Natur des Drahtes abhängt. RIESS nennt diese Materialkonstante die „Verzögerungskraft" des Drahtes, das ist unser heutiger spezifischer Widerstand. Wenn diese an sich bedeutungsvollen Versuchsergebnisse, welche die wichtige Beziehung zwischen elektrischer Energie und Wärme eigentlich schon eingeschlossen enthalten, damals nicht in ihrem ganzen Inhalt erkannt wurden, so lag dies in erster Linie wohl an den variablen und schwerer übersehbaren Ausgleichverhältnissen bei begrenzten Mengen von Reibungselektrizität. Aus diesem Grunde fiel die wegen ihrer Nachhaltigkeit bedeutungsvollste Entdeckung dieses Gebietes dem Erforscher

der Wärmewirkungen des konstanten galvanischen Stromes zu. Erst die Arbeiten des Engländers JOULE (1841) deckten die für das wenig später von R. MAYER zuerst (1842) ausgesprochene Energieprinzip so wichtige Beziehung zwischen Wärme und strömender elektrischer Energie auf, als er zunächst das Gesetz für die Wärmemenge aufsuchte, die in einem Leiter von angenähert gleichem elektrischen Widerstand durch verschiedene Stromstärken entwickelt wird. Der Bericht der Royal Society über die mit ausserordentlich einfachen Mitteln gemachte Entdeckung lautet:

Die Untersuchungen des Verfassers sind auf die Ermittelung des verschiedenen Grades der Leichtigkeit gerichtet, mit welcher verschiedene Arten Metall von verschiedener Grösse sich beim Durchgange der VOLTAschen Elektrizität erhitzen. Der von ihm hierzu benutzte Apparat bestand aus einer Spule des dem Versuche zu unterwerfenden Drahtes, der in ein Gefäss mit Wasser gebracht war, dessen Temperaturänderung durch ein sehr empfindliches Thermometer gemessen werden konnte; und einem Galvanometer, um die durch den Draht geschickte Menge Elektrizität zu messen, welche durch die Wassermenge geschätzt wurde, die durch dieselbe Elektrizität zersetzt wurde. Der aus den Ergebnissen der Versuche gezogene Schluss ist, dass die Wärmewirkung der durchgeschickten Elektrizität dem Widerstande proportional ist, welcher sich ihrem Durchgange widersetzt, welches auch die Länge, Dicke, Form und Art des Metalles sei, das den Strom schliesst; und dass, caeteris paribus, die Wärmewirkung im verdoppelten Verhältnis (im Quadrat) der durchgeschickten Elektrizität ist; somit auch im doppelten Verhältnis der Geschwindigkeit des Durchganges. Aus seinen Versuchen schliesst er auch, dass die durch Verbrennung des Zinks im Sauerstoff entwickelte Wärme ebenso eine Folge eines Widerstandes gegen elektrische Leitung ist.

Dieses an sich später als völlig richtig bestätigte Gesetz (1844 von A. E. BECQUEREL (Sohn) und 1848 durch POGGENDORF) wurde von ihm aus nicht gerade völlig überzeugenden Versuchen nicht nur für metallische Leiter, sondern bald darauf auch für Elektrolyte aufgestellt, wobei der gefühlsmässig richtige Blick die Ungenauigkeit der Versuchsresultate ergänzte bezw. unschädlich machte.

Seine weiteren Schlüsse zielen bereits auf das Energieprinzip hin, das in der 1847 erschienenen Schrift von HELMHOLTZ: „Über die Erhaltung der Kraft" an der Hand der Vorgänge im galvanischen Stromkreis behandelt wird. Diese Arbeiten verknüpften die Elektrophysik mit allen übrigen Zweigen der Physik und bereiteten weiterhin die Aufführung des modernen, auf dem gemeinschaftlichen Fundament der Energiegleichungen ruhenden Baues der Naturwissenschaften vor.

25. Faradays Gesetz der elektrochemischen Wirkung.

Ein wichtiges Glied in der Kette der Vorbedingungen hierzu bildete die Aufdeckung derjenigen elektrischen Ausgleicherscheinungen, welche in das Gebiet der Elektrochemie hinüberreichen. Die durch den elektrischen Strom hervorgerufenen chemischen Zersetzungserscheinungen hatten bereits in der vorausgegangenen Periode einen erbitterten Kampf zwischen VOLTAS Anhängern und den „Elektrochemikern" verursacht (vgl. **14**), sowie eine gewisse Proportionalität zwischen Stromstärke und chemischer Wirkung beobachten lassen, doch erst 1833 wurde durch FARADAY das in diesen Regionen herrschende Hauptgesetz aufgedeckt. So hatte aus den damals zahlreich angestellten Wasserzersetzungsversuchen auch OHM bereits in seiner zweiten Arbeit (1826) unter Benutzung der von BISCHOF gefundenen Zahlen den Schluss gezogen, „dass die wasserzersetzende Kraft der Kette der magnetischen proportional sei." Die wichtige Beziehung zwischen Elektrizitätsmenge und chemischer Zersetzung wurde aber erst (1832) von FARADAY (vgl. **17**) auf folgendem Wege aufgedeckt: Zwecks Feststellung der „Mass-

beziehung zwischen der gemeinen und der VOLTAschen Elektrizität" (vgl. Exp. Res. III, 361 u. ff.) berichtet FARADAY:

361. Nachdem ich die Identität hinlänglich sichergestellt glaubte, ging meine nächste Bemühung dahin, ein gemeinsames Mass oder eine bekannte Quantitätsbeziehung zwischen der durch eine Elektrisiermaschine erregten und der Elektrizität einer VOLTAschen Säule zu erhalten, nicht bloss um ihre Identität zu bestätigen (378), sondern auch um gewisse allgemeine Sätze zu erreichen (366, 377 u. s. w.) und die Forschungsmethoden zu erweitern und hierzu die chemischen Kräfte dieses wunderbaren und subtilen Agens zu verwerten.

362. Die erste zu erledigende Frage war die, ob dieselbe, unter verschiedenen Umständen durch das Galvanometer gesandte absolute Quantität gewöhnlicher Elektrizität stets dieselbe Ablenkung der Nadel hervorbringe.

Indem er einerseits die Umdrehungen der Elektrisiermaschine als Mass für die erzeugte statische Elektrizitäts*menge* benutzt, andererseits den grössten Ausschlag seines als Schwingungsgalvanometer benutzten Messinstrumentes als Mass für die beim Ausgleich jeden Drahtquerschnitt durchströmende Elektrizitätsmenge ansieht, kommt er durch Variation der benutzten Flaschenzahl und des Widerstandes im Entladungskreis zu folgendem Schluss:

366. Hieraus folgt: wenn dieselbe absolute Quantität der Elektrizität durch das Galvanometer geht, so ist, welches auch ihre Intensität sein mag, die ablenkende Kraft auf die Magnetnadel gleich.

Dieser Ausschlag bildet ferner den Vergleichspunkt für einen Stromstoss, der in gleicher Grösse durch ein winziges galvanisches Element erzeugt wird. Die durch den Galvanometerausschlag verlangte Gleichsetzung der in beiden Fällen in Bewegung gesetzten Elektrizitätsmenge wagt er entgegen dem heimlich von der Energiegleichung beeinflussten Gefühl vorzunehmen, indem er schreibt:

Trotz dieses scheinbar ungeheueren Missverhältnisses sind die Resultate doch in völligem Einklang mit den Wirkungen, welche bekanntermassen bei Variationen der Intensität und Quantität des elektrischen Fluidums auftraten.

372. Um auch eine Beziehung zur chemischen Aktion aufzufinden, wurden die Drähte nun $^5/_8$ Zoll tief in die Säure getaucht und darin gelassen, und die Nadel beobachtet, sobald sie eine feste Lage angenommen hatte; sie stand, soweit das unbewaffnete Auge es unterscheiden konnte, an dem Skalenteil $5^1/_2$. Man kann daher sagen, dass eine dauernde Ablenkung von dieser Grösse einen konstanten VOLTAschen Strom angiebt, welcher in acht Schlägen meiner Uhr (369) ebenso viel Elektrizität liefert als die durch dreissig Umdrehungen der Maschine geladene Batterie.

Als Vergleichsobjekt der chemischen Aktion dient ein durch Zersetzung hervorgerufener und in seiner Dunkelheit nach Augenschein geschätzter Jodfleck.

Eine mehrmalige wechselweise Wiederholung der vergleichenden Versuche ergab das konstante Resultat, dass der Normalstrom der VOLTAschen Elektrizität während acht Uhrschläge in seiner chemischen Wirkung gleich war dreissig Umdrehungen der Maschine; achtundzwanzig Umdrehungen reichten sichtlich hierzu nicht aus.

376. Hieraus folgt, dass der acht Uhrschläge dauernde Elektrizitätsstrom der VOLTAschen Normalbatterie hinsichtlich der magnetischen Ablenkung (371) sowohl als auch der chemischen Kraft gleich war dem durch dreissig Umdrehungen der Maschine erregten Strome.

377. Es folgt auch für diesen Fall elektrochemischer Zersetzung und es gilt wahrscheinlich in allen Fällen, dass die chemische wie die magnetische Kraft (366) direkt proportional ist der absoluten Quantität der durchgegangenen Elektrizität.

Wenn hier wiederum die Aufdeckung eines so wichtigen Gesetzes mit einem verhältnismässig so primitiven Erkennungsmittel, wie der Jodfleck,

eingeleitet wurde, so zeugt dies von dem durchdringenden Blick und richtigen Gefühl des Entdeckers. Begnügte sich auch FARADAY vorläufig hiermit, so war er doch eine viel zu gründliche Natur, um sich bei diesen Versuchen völlig zu beruhigen. Zwar ging er zunächst an die Lösung einiger anderer Probleme, deren Zusammenhang mit jenem nur äusserlich gering erscheint, wie der Vorgang der Elektrizitätsleitung (Exp. Res. IV) und die Absorption von Gasen durch Metalle, namentlich Platin. Nach Erledigung derselben wendete er sich (1833) in seiner siebenten Reihe wieder der elektrochemischen Zersetzung zu, um in der am 9. Januar 1834 der Royal Society vorgelegten Abhandlung als wesentlichen Teil des nach ihm benannten Gesetzes die Ergänzung zu dem obigen Gesetz zu liefern, unter gleichzeitiger Angabe des Voltameters als Strommessinstrument. Nachdem er zur Vermeidung von Irrtümern eine Reihe von heute noch gültigen Bezeichnungen, wie Elektroden, Elektrolyte, Jonen, eingeführt und zunächst die Wasserzersetzung unter den verschiedensten Verhältnissen bezüglich Elektroden und Salzgehalt messend verfolgt hat, fasst er die Ergebnisse mit folgenden Worten zusammen:

Demnach bringen Änderungen in der Natur der Lösung keine Änderung in der Konstanz der elektrolytischen Aktion auf Wasser hervor.

731. In betreff grosser und kleiner Elektroden habe ich bereits gesagt, dass eine Änderung in der Reihenfolge keine Änderung in dem allgemeinen Effekt zur Folge hat (715). Dasselbe war der Fall bei verschiedenen Lösungen oder verschiedenen Intensitäten; und wie auch die Versuchsbedingungen variiert werden mochten, die Resultate stimmten vorzüglich miteinander überein und bewiesen, dass die elektrochemische Aktion noch dieselbe war.

732. Die vorstehende Untersuchung betrachte ich als einen ausreichenden Beweis für den sehr überraschenden und wichtigen Satz, insofern er das Wasser betrifft, dass, wenn dieses der Einwirkung des elektrischen Stromes unterworfen wird, eine der durchgegangenen Elektrizitätsmenge genau proportionale Menge desselben zersetzt wird, wenn auch die Bedingungen und Umstände, unter die man es bringt, auf tausendfache Weise variiert werden; und dass ferner, wenn man sich gegen die von gewissen sekundären Wirkungen herrührenden Störungen (742 u. s. w.), sowie gegen die Lösung oder Wiedervereinigung der Gase und die Entbindung von Luft sichert, die Produkte der Zersetzung mit solcher Genauigkeit gesammelt werden können, dass sie einen ganz vorzüglichen und wertvollen Messer für die an ihrer Entwickelung beteiligte Elektrizität bilden.

739. Das Instrument ist der einzige bisher bekannte wirkliche Messer der VOLTAschen Elektrizität. Denn ohne sich im geringsten mit der Zeit zu ändern, noch von Änderungen der Intensität oder sonstigen Veränderungen des Stromes selbst, welcher Art sie auch sein, und welche Ursache sie auch haben mögen, noch auch von Unterbrechungen der Aktion beeinflusst zu werden, bekundet er mit Genauigkeit die durch ihn hindurchgegangene Elektrizitätsmenge und bringt sie zur Anschauung. Ich habe es deshalb VOLTA-Elektrometer genannt.

Nach einer grossen Reihe von Untersuchungen über elektrochemische Zersetzung der verschiedensten Elektrolyte schliesst er:

821. Alle diese Thatsachen vereint, steigern, wie ich glaube, bis zur Unwiderleglichkeit den Beweis von der Wahrheit des wichtigen Satzes, den ich zu Anfang aussprach, nämlich, dass die chemische Kraft eines elektrischen Stromes direkt proportional ist der absoluten Menge der durchströmenden Elektrizität (377, 783). Sie beweisen auch, dass dies nicht bloss für eine Substanz, wie Wasser, sondern für alle elektrolytischen Körper im allgemeinen gilt, und dass ferner die mit irgend einer Substanz erhaltenen Resultate nicht bloss untereinander übereinstimmen, sondern auch mit denen, welche andere Substanzen ergeben, sodass sich alles zusammen zu einer Reihe fester elektrochemischer Aktionen kombiniert (505).

Über die Bedeutung von FARADAYS Leistung für die durch ihn gleichsam selbständig werdende Elektrochemie urteilt OSTWALD in folgender Weise (vgl. OSTWALD, Kap. XIII, 13, 588).

Überschaut man die Summe von FARADAYS Leistungen für die Elektrochemie, so findet man sie ausserordentlich gross. Durch die Entdeckung seines Gesetzes der festen elektrolytischen Wirkung hat er für unser Gebiet etwa dasselbe gethan, was OHM für die Lehre vom elektrischen Strom gethan hatte, nämlich das zahlenmässig ausdrückbare Grundgesetz gefunden, auf welches alle weiteren Messungen zurückzuführen sind, und welches erst gestattet, Gesetz und Ordnung in die Fülle der Erscheinungen zu bringen. Aber dies ist nicht das einzige Verdienst dieser Arbeiten. Die sachgemässe Unterscheidung der beiden elektrischen Grössen, der Elektrizitätsmenge und der Spannung oder Intensität, ist zwar nicht FARADAYS Werk allein, denn sie war schon von VOLTA in wesentlich derselben Weise durchgeführt worden. Von grösster Bedeutung aber und ganz FARADAYS Verdienst ist die richtige Zuordnung, welche er zwischen diesen elektrischen Grössen und den entsprechenden chemischen bewerkstelligt hat, indem er die Elektrizitätsmenge mit der Stoffmenge, die elektrische Spannung mit der chemischen Verwandtschaft in Verbindung brachte. Dadurch hatte er die Grundlagen der künftigen chemischen Theorie der VOLTAschen Kette gelegt, denn nach mehr als einem halben Jahrhundert angestrengter Arbeit ist die Forschung genau auf den gleichen Standpunkt gelangt. Die inzwischen zu leistende Arbeit bestand vornehmlich in der Ausbildung des Begriffes der chemischen Verwandtschaft, welcher zu FARADAYS Zeiten noch keinen scharf definierbaren, und noch weniger einen zahlenmässig aufweisbaren Inhalt besass. Als dieser gefunden war, liess sich der von FARADAY nur postulierte Zusammenhang in der That aufweisen und so die chemische Theorie der galvanischen Erscheinungen durchführen.

26. Stromwirkungen und technische Ansätze.

Für die Elektrizitätslehre, namentlich für die spätere Aufklärung des vielumstrittenen Kontaktproblems gestaltet sich eine in demselben Jahr (1834) von dem Uhrmacher PELTIER gemachte Beobachtung zu einer wichtigen Entdeckung. PELTIER fand, dass ein Strom, welcher einen aus verschiedenen Metallen bestehenden Leiterkreis durchströmt, an den Berührungsstellen jener verschieden grosse Erwärmung, teilweise sogar Abkühlung erzeugt, je nach der Reihenfolge der Metalle und der Richtung des Stromes. Obwohl er diese Erscheinung an verschiedenen Metallkombinationen messend weiter verfolgte, so wurde doch im Verlaufe dieser Periode weder von ihm noch von anderen der enge Zusammenhang mit den thermoelektrischen Erscheinungen und ihre Stellung als Umkehrung von SEEBECKS Entdeckung erkannt.

Die Wechselbeziehung zwischen Elektrizität und Licht, welche in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts in den Mittelpunkt des Interesses trat, und deren Aufklärung mit der wichtigsten physikalischen Entdeckung dieses Zeitraumes verknüpft ist, reicht mit ihren Anfängen noch in den Schluss der vorliegenden Epoche. Es ist dies die 1845 von FARADAY entdeckte Drehung des polarisierten Lichtstrahles im magnetischen Felde (vgl. **39**).

Von den später durch ihre technische Entwickelung bedeutsamen Entdeckungen und Erfindungen, welche die Nachbargebiete der Elektrochemie und Schwachstromtechnik betreffen, sind namentlich folgende zu erwähnen: die in ihren Grunderscheinungen zwar schon von DANIELL beobachtete, aber in ihrer technischen Wichtigkeit erst von JACOBI 1839 erkannte und besonders durch BÖTTGER weiterentwickelte Galvanoplastik; die als Ausgangspunkt der elektrochemischen Metallurgie zu betrachtende Entdeckung (1838 P. A. 46, 285) der Ausscheidung von Metallen (Silber, Kupfer, Blei) aus ihren Erzen auf elektrolytischem Wege durch A. C. BECQUEREL (Vater); sowie die Benutzung der Feldwirkung elektrischer Ströme für telegraphische Zwecke. Geschichtlich interessant bleibt auch folgende Benutzung von magnet-elektrischen Maschinen als Motoren und ihres Betriebes durch Primärbatterien wegen der vorübergehenden, merkwürdig weit getriebenen technischen Entwickelung seitens des

Petersburger Erfinders der Galvanoplastik. Die hierauf bezüglichen Stellen aus Jacobis Brief an Faraday (1839) lauten:

Vor einiger Zeit hat mich ein glücklicher Zufall bei meinen elektromagnetischen Arbeiten zu der Entdeckung geführt, dass man mit Hülfe der Voltaschen Wirkung erhabene Kopien von gestochenen Kupferplatten machen kann, von denen auf gleichem Wege umgekehrte Kopien erhalten werden können, sodass man es in der Gewalt hat die Kupferkopien in jeder beliebigen Anzahl zu erhalten. Durch diesen Voltaschen Prozess werden die feinsten, ja mikroskopische Striche wiedergegeben, und die Kopien sind so identisch mit dem Original, dass auch die strengste Untersuchung nicht den kleinsten Unterschied finden kann.

Was die technische Bedeutung dieser Voltaschen Kopien anlangt, so möchte ich bemerken, dass man die gestochene Kathode nicht nur von Kupfer oder negativeren Metallen nehmen kann, sondern auch von positiveren und deren Legierungen (ausgenommen Messing), obwohl diese Metalle u. s. w. die Kupferlösung für sich viel zu heftig zersetzen. So kann man beispielsweise Stereotypen in Kupfer machen, welche nach Belieben vervielfältigt werden können. Ich werde binnen kurzem die Ehre haben, Ihnen ein Basrelief aus Kupfer zu schicken, dessen Original aus einer plastischen Substanz gebildet ist, die sich allen Bedürfnissen und Kaprizen der Kunst anschmiegt. Durch dies Verfahren werden alle diese feinen Züge erhalten, welche die hauptsächlichste Schönheit eines derartigen Werkes ausmachen, und welche beim Giessen gewöhnlich verloren gehen, da dieser Prozess sie nicht in aller ihrer Reinheit wiedergeben kann. Die Künstler müssen dem Galvanismus sehr dankbar sein, der ihnen diesen neuen Weg hierzu eröffnet hat . . . .

Bei der Anwendung des Elektromagnetismus zur Bewegung von Maschinen war die grösste Schwierigkeit immer die Umständlichkeit und schwierige Handhabung der Batterien. Diese Schwierigkeit besteht nicht länger. Während des letzten Herbstes, in einer vielleicht schon zu weit vorgeschrittenen Jahreszeit, habe ich, wie Sie vielleicht aus den Zeitungen ersehen haben werden, meinen ersten Versuch in der Schiffahrt auf der Newa in einer zehnrudrigen Schaluppe mit Radrudern, die durch eine elektromagnetische Maschine in Bewegung gesetzt werden, gemacht. Obwohl wir während ganzer Tage fuhren, und gewöhnlich mit zehn oder zwölf Personen an Bord, so war ich doch nicht sehr befriedigt von diesem ersten Versuche, denn es ergaben sich so viele Fehler der Konstruktion und Mängel der Isolierung an den Maschinen und der Batterie, welche nicht auf der Stelle verbessert werden konnten, dass es mir äusserst unangenehm war. Da jetzt diese Verbesserungen und wichtigen Veränderungen beendigt sind, so werden die Versuche binnen kurzem wieder aufgenommen werden. Die Erfahrungen des letzten Jahres, nebst den Verbesserungen der Batterie ergeben, dass zum Hervorbringen einer Pferdekraft (wie bei Dampfmaschinen) eine Batterie von 20 Quadratfuss Platin, in entsprechender Weise angeordnet, erforderlich ist; ich hoffe aber, dass 8 bis 10 Quadratfuss die Wirkung ergeben werden. Wenn der Himmel mir meine Gesundheit erhält, welche durch beständige Arbeit ein wenig angegriffen ist, so hoffe ich binnen eines Jahres ein elektromagnetisches Schiff von 40 bis 50 Pferdekraft hergerichtet zu haben.

Der von Ampère gemachte erste Vorschlag zu einem elektromagnetischen Telegraphen wurde thatsächlich von Ritchie ausgeführt, wobei ähnlich wie bei Sömmering jedem Zeichen eine Nadel entsprach, sodass mit dem gemeinschaftlichen Rückleitungsdraht 25 Drähte für einen Apparat nötig wurden. Solche Apparate sollen thatsächlich gebraucht worden sein, unter anderen von Fechner und Davy (vgl. Hoppe § 404). Den wesentlichen Schritt, die Zahl der Leitungen auf 2 verringert, und die Richtung und Aufeinanderfolge der Stromstösse bezw. Nadelausschläge für die einzelnen Zeichen benutzt zu haben, verdankt man Gauss und Weber (1834), welch letzterer in Göttingen zwischen dem physikalischen Kabinet, der Sternwarte und dem magnetischen Observatorium eine mehr als kilometerlange Leitung herstellte. Unabhängig von ihnen hat Schilling eine ganz ähnliche Ausbildung des Nadeltelegraphen ersonnen. Auf Anregung von Gauss und Weber hat alsdann namentlich Steinheil in München die weitere Ausbildung des Telegraphen übernommen, eine mehrere Kilometer lange Leitung im Jahre 1837

in München angelegt, im Jahre 1838 zwischen Nürnberg und Fürth zuerst eine Bahnschiene als Rückleitung benutzt und aus dem beobachteten Übertritt des Stromes in die andere Schiene die Erdrückleitung für die Zweeck der Telegraphie entdeckt. Aus der weiteren Entwickelung sind namentlich noch die Verdienste W. v. SIEMENS zu erwähnen, welcher die Drahtisolierung durch Guttaperchaumhüllung ausbildete (1847). Die hierdurch ermöglichten unterirdischen Leitungen führten ihn zur Entdeckung der Kapazität dieser Leitungen (1850, P. A. 79, 487) unter Erklärung ihrer kondensierenden Eigenschaft nach Analogie einer Leydener Flasche. (Weiteres vgl. Bd. VI und XII).

Eine wesentliche Vorbedingung für die Weiterentwickelung der Zeichengebung bildete die inzwischen erfolgte Ausbildung der Elektromagnete, d. h. die technische Ausnutzung der magnetisierenden Wirkung des Stromes, welche in Gestalt der Ankeranziehung an einem beliebig entfernten Ort in den mannigfaltigsten Mechanismen Verwertung fand. Besonders wichtige Erfindungen auf diesem Gebiete waren diejenigen des sogenannten „Hammers" von WAGNER; von DU BOIS-REYMOND und RUHMKORFF als Feder mit Eisenanker ausgebildet fand er zur Erzeugung schnell wechselnder Induktionsströme Verwendung bei dem Vorläufer der technischen Transformation (vgl. **34**, sowie Bd. V); ferner die Ausbildung des sogenannten Relais durch WHEATSTONE (1839) zur Auslösung eines Uhrwerkes, Lokalstromes oder dergleichen, die ihn zur Erfindung seines Zeigertelegraphen anregte. Auf dem gleichen Untergrund entwickelten sich bei späterer Ausdehnung der Telegraphie einerseits die Zeichenschreiber von MORSE und PAGE, andererseits die Typendrucker, deren erster von WHEATSTONE (1841) herrührt, während W. von SIEMENS zuerst auf dem Prinzip des Zeigertelegraphen mit Synchronbewegung einen Typendrucker entwickelte, der in der Einrichtung von HUGHES (1855) die grösste Verbreitung fand. (Weiteres siehe Bd. XII.)

27. Ausgleichwiderstände. Durch DAVY und OHM war der elektrische Widerstandsbegriff in der heute üblichen Fassung eingeführt, d. h. auf die Leiterdimensionen und einen Materialkoeffizienten zurückgeführt worden. Dieser Materialkoeffizient, den OHM kurzweg als Leitungsvermögen (vgl. **24**) — wir setzen heute „spezifisch" hinzu — bezeichnet hatte, während RIESS für seinen reziproken Wert die Benennung „Verzögerungskraft" gebraucht (vgl. **24**), musste von der Temperatur abhängig sein, wie bereits DAVY und OHM bemerkt hatten. Die Gesetzmässigkeit dieses Zusammenhanges wurde aber erst von LENZ (1835, P. A. 34, 418, ferner 1838: 45, 105) für Metalle untersucht und für die Leitungsfähigkeit L_t bei einer beliebigen Temperatur t die Formel aufgestellt

$$L_t = a + bt + ct^2,$$

worin a, b, c Konstante sind. Unter Vernachlässigung des letzten Gliedes bei der häufig praktisch ausreichenden ersten Annäherung ist a der Wert der Leitungsfähigkeit für die Normaltemperatur, d. h. Temperaturabweichung $t = o$, und b pflegt kurzweg als Temperaturkoeffizient bezeichnet zu werden. Dieser letztere Wert wurde bei Metallen (auf Leitfähigkeit bezogen) negativ gefunden, bei Elektrolyten als positiv zuerst von OHM (1844), sowie von HANKEL (1846) nachgewiesen.

Die Fehler, welche in der Bestimmung der spezifischen Leitfähigkeit von Elektrolyten bisher durch das Auftreten der Polarisation verursacht

worden waren und zwar im Sinne einer scheinbaren Widerstandsvergrösserung durch die Gegen-EMK, hat zuerst WHEATSTONE (1844) durch eine Differenzmessung beseitigt. Unter Anwendung desselben Verfahrens hat (1846) A. E. BECQUEREL (Sohn) die Leitfähigkeit von Salzlösungen abhängig vom Salzgehalt bestimmt und nahezu gleichzeitig (1847) HORSFORD die Gültigkeit der OHMschen Widerstandsformel

$$R = \frac{l}{q \cdot k},$$

d. h. das Vorhandensein eines spezifischen Leitungskoeffizienten k, auch für Flüssigkeiten nachgewiesen.

Eine gewisse Notwendigkeit zur Klarlegung des Einflusses der elektrischen Stromstärke, bezw. der damit verbundenen Erwärmung auf den Widerstand der Leiter hatte sich durch die inzwischen erfolgte Ausbildung der Messtechnik und namentlich durch die Anwendung von Widerstandsrheostaten herausgestellt.

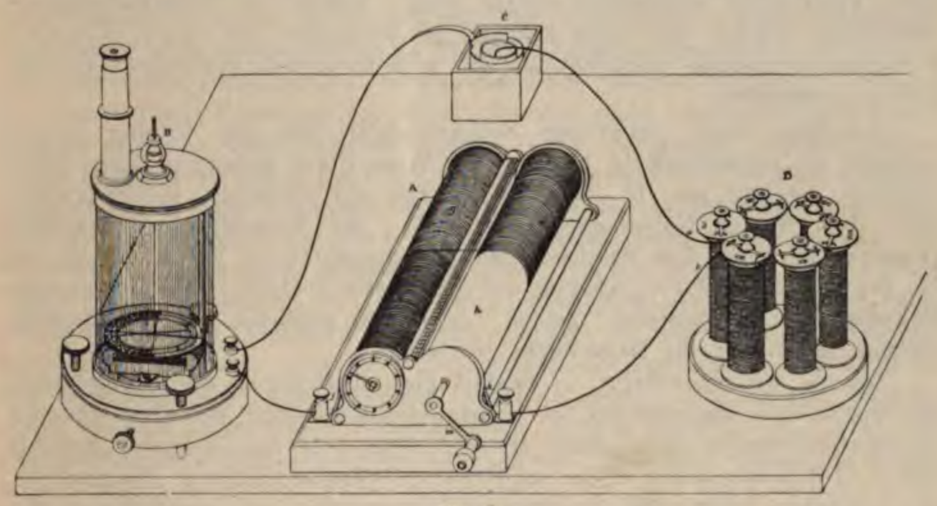


Fig. 3.

Nahezu gleichzeitig und jedenfalls unabhängig von einander entstanden folgende Konstruktionen: der „Walzenrheostat" aus Messingdraht von WHEATSTONE (1840), der aus mehreren Vergleichsdrähten bestehende „Widerstandsmesser" von POGGENDORF (1841), der sogenannte „Stromregulator" von JACOBI (1840) aus Kupfervitriollösung zwischen Kupferplatten, deren Entfernung genau messbar war und endlich das mit WHEATSTONES „Rheostat" fast identische „Voltagometer" (vgl. OSTWALD, Kap. XIV, 19) gleichfalls von JACOBI. Die Verwendung von Widerstandsrollen, deren Einheiten in Fuss Draht angegeben waren, wurde zuerst von WHEATSTONE in Verbindung mit seinem Rheostaten eingeführt. Diese für die Entwickelung der Messtechnik wichtige Stelle über WHEATSTONES Messgerät (Fig. 3) lautet:

Es besteht aus sechs Rollen eines mit Seide besponnenen Kupferdrahtes von etwa $^1/_{200}$ Zoll Durchmesser. Zwei dieser Rollen hatten je 50 Fuss Draht, die übrigen resp. 100, 200, 400 und 800 Fuss. Die beiden Drahtenden jeder Rolle sind oben befestigt an kurze, dicke Drähte, die dazu dienen, alle Drahtrollen zu einer Länge zu vereinigen; die beiden Drähte *a* und *b* bilden die Enden sämtlicher Rollen und dienen dazu, sie mit der Kette zu vereinigen. An der oberen Fläche einer jeden Rolle befindet sich eine doppelte drehbare Messingfeder, deren Enden nach Belieben entweder auf die Enden der dicken

Verbindungsdrähte gebracht oder von ihnen entfernt und blos auf das Holz geschoben werden können. In der letzten Stellung muss der Strom durch die Drahtrolle gehen, in der ersten aber geht er durch die Feder und schliesst den ganzen Widerstand der Drahtrolle von der Kette aus . . . . Dreht man die Federn gehörig, so kann man jedes Multiplum von 50 Fuss, bis zu 1600 Fuss aufwärts, in die Kette bringen.

Die Verwendung von Widerständen, welche durch Längenänderung eine vergleichende Messung zuliessen, war hierdurch zwar gegeben, doch bedurften diese Widerstandssätze noch vielfacher Abänderungen bis ihnen endlich Siemens (1860) in der Gestalt der Stöpselrheostaten eine für genauere Messzwecke in weiten Grenzen brauchbare Ausbildung gab.

28. Entwickelung der Galvanometrie.

Es bedarf nach dem Vorausgegangenen kaum noch der Feststellung, dass durch Auffindung der Feldwirkung des elektrischen Stromes die Benutzung dieser Ausgleichwirkung für Messzwecke sich alsbald zu dem hervorragendsten Förderungsmittel aller elektrischen Forschungen entwickelte, ja dass dieses galvanometrische Hülfsmittel als die Vorbedingung der wichtigen Fortschritte angesehen werden kann, welche im Vorausgegangenen Erwähnung fanden und diese Periode mit Rücksicht auf fundamentale Forschungsergebnisse vielleicht zu der gehaltreichsten der ganzen Elektrophysik gestalteten.

Nachdem durch Oerstedts Beobachtungen (**16**) das Prinzip unseres heutigen Galvanometers in seiner einfachsten Form gefunden war, führte zunächst Ampère am 18. September 1820 ein einfaches Messinstrument unter dem Namen Galvanometer vor (**23**). Der Vorschlag zur Erzielung grösserer Wirkung dem Schliessungsdraht Spiralform zu geben, wurde am 25. September 1820 von Ampère auf Grund seiner Theorie der permanenten Magnete (vgl. **30**) gemacht, jedoch von Arago zunächst nur zur Magnetisierung, nicht aber für Messzwecke benutzt.

Die — wie es scheint — unabhängige Auffindung der Antriebssummierung auf die Magnetnadel bei mehrfacher Umwindung derselben mit dem stromdurchflossenen Leiter fand zunächst beim Schweiggerschen „Multiplikator" (1820) mit seiner etwas sonderbaren Schleifenwicklung Verwendung, im folgenden Jahr unter bewussterer Anwendung des wesentlichen Momentes der Spulenwicklung beim sogenannten „Kondensator" Poggendorfs, während wahrscheinlich unabhängig hiervon sich Cumming in England ein ähnliches (erst 1823 bekannt gegebenes) Instrument erdachte, jedoch unter Benutzung von feststehenden Kompensationsmagneten, welche eine Empfindlichkeitssteigerung gestatteten. Eine weitere Steigerung nach dieser Richtung brachte alsdann im Jahre 1825 die erste Verwendung der von Ampère (**23**) erfundenen astatischen Nadelpaare durch den Italiener Nobili. Diese fast zu rasche Entwickelung der Empfindlichkeit hat sogar, wie es scheint, zuweilen störend bei den Forschungen gewirkt, indem sie die Unterscheidung wesentlicher und unwesentlicher Einflüsse auf die elektrischen Ausgleicherscheinungen erschwerte.

Dass für die Forschungen der ersten Jahre keine sehr weit gehende Empfindlichkeit erforderlich wurde, dafür spricht auch der Umstand, dass die von Poggendorf schon 1826 (P. A., Bd. 7, 127) erfundene Spiegelablesung lange Zeit nur für magnetische Beobachtungen Verwendung fand und namentlich durch Gauss und Weber (1833) weiter ausgebildet wurde; erst 1837 wurde sie von Weber in Verbindung mit der Bifilarsuspension zum ersten Mal für elektrische Messungen an seinem ersten Dynamometer

zur Bestimmung der absoluten Stromintensität und des elektrochemischen Äquivalents benutzt und bald darauf auch beim Spiegelgalvanometer.

Das Verfahren bei der Strommessung, d. h. die Art der Benutzung des erzielten Nadelausschlages war anfangs aber durchaus nicht einwandfrei. Der grössere oder geringere Nadelausschlag liess zwar eine Vergleichung von Stromstärken zu, nicht aber eine eigentliche Messung und die anfangs allgemein angenommene Proportionalität zwischen Stromstärke und Nadelausschlag musste natürlich öfters sehr grosse Fehler im Gefolge haben. Diese Fehlerhaftigkeit der Strommessung, welche bei den direkt zeigenden Multiplikatoren auch Poggendorf noch begeht, wurde in sehr bemerkenswerter Weise durch Ohm vermieden (vgl. **24**), indem er die einfache Oerstedtsche Ablenkungswirkung benutzte, aber nicht die Grösse des Ausschlages als Mass für die Stromstärke nahm, sondern die von Coulombs Drehwage herübergenommene Torsionskraft, welche die Nadel wieder auf Null brachte. Hierdurch wurde einerseits eine richtige Strommessung und dank diesem Umstand die Auffindung der wichtigsten Ausgleichbeziehung ermöglicht, andererseits ein neues galvanometrisches Messinstrument in Gestalt des ersten Torsionsgalvanometers erfunden. Merkwürdigerweise scheint aber auch diese Neuerung des Messverfahrens nicht hinreichend gewürdigt worden zu sein, denn Fechner benutzt (1829) bei seinen Untersuchungen weder dieses, noch das zu jener Zeit bereits verbesserte Verfahren des direkten Ausschlages. Letzteres bestand nach Erkenntnis der mangelnden Proportionalität mit der Stromstärke darin eine Korrektion beim Übergang auf die Stromstärke anzubringen. Fechner brachte vielmehr folgendes, seither aber wegen seiner Mühsamkeit und geringeren Genauigkeit verlassene, wenn auch prinzipiell richtige Verfahren zur Anwendung. Er stellte seinen Multiplikator nämlich so ein, dass bei Stromlosigkeit der Spule die Nadel nicht in der Windungsebene stand, sondern senkrecht dazu. Bei Stromdurchgang erhielt er jetzt zwar keinen Nadelausschlag, jedoch ein geändertes Feld, indem sich Erdfeld und Spulenfeld summierten. Versetzte er nun die Nadel in Schwingungen, so war die Schwingungsdauer je nach der Feldstärke oder der damit proportionalen Stromstärke eine kleinere. Die Überzahl der Schwingungen in einer bestimmten Zeiteinheit über die bei stromlosem Galvanometer beobachtete Zahl gab ins Quadrat erhoben ein direktes Mass für die Stromstärke, da nach der Formel $\tau = \pi \sqrt{\frac{T}{D}}$ die der Schwingungszahl reziproke Schwingungsdauer τ dem Trägheitsmoment T direkt proportional, der Richtkraft D umgekehrt proportional ist.

Einen wesentlichen Fortschritt im Messverfahren mit direktem Ausschlag stellt die Ausbildung des Galvanometers in der Form der Tangentenbussole durch Pouillet (1837) dar, deren erste Ausführung aus einem nahezu einen Kreis bildenden Kupferband von 1,6 m Länge, 2 cm Breite und 2 mm Dicke bestand, an dessen Mitte an einem Kokonfaden eine 5 bis 6 cm lange Magnetnadel hing, deren etwa 16 cm lange hölzerne Zeigerfortsetzung über einer Kreisteilung spielte. Bei Einstellung jener Kreisebene in die Erdfeldrichtung, welche bei Stromlosigkeit mit der Nadelebene zusammenfällt, gab die Tangente des Nadelausschlages (α) das Verhältnis der Erdfeldstärke (H) zur Intensität des Stromfeldes ($J \cdot C_w$) in der Kreismitte, oder genauer an den Polstellen der Nadel. Bei dieser Beziehung $\operatorname{tg} \alpha = \frac{J \cdot C_w}{H}$ folgt

aus der Proportionalität des Strom f e l d e s ($J \cdot C_r$) an einem gegen den Leiter bestimmten Punkte mit der Strom s t ä r k e (J) im Leiter auch die Proportionalität der Tangente des Ausschlages mit der Stromstärke im Leiterkreis, solange die Bewegung der Nadel keine wesentliche Änderung des Stromfeldes an den Polstellen verursacht. Dass bei drehbar eingerichtetem Leiterkreis und Vornahme einer Nachdrehung desselben im Sinne des erfolgten Ausschlages, bis Nadel und Kreisebene wieder zusammenfallen, dieser Nachdrehungswinkel dem Sinus der Stromstärke proportional ist, fand POUILLET ebenfalls, wodurch die für s c h w ä c h e r e Ströme, d. h. Spulenfeld $J \cdot C_r < H$ (Horizontalintensität), geeignete Abänderung der Tangentenbussole zur Sinusbussole gegeben war, die namentlich von POGGENDORF (1840) eine weitere Ausbildung erfuhr.

Eine besonders grosse Bedeutung erlangte dieser POUILLETsche Messapparat bei seiner Verwendung durch Wilhelm WEBER (1840) zur sogenannten a b s o l u t e n Massbestimmung. Unter Zugrundelegung der dynamischen Grundgleichung Kraft = Masse × Beschleunigung hatte zuerst GAUSS (1833) eine auf die Erdmasse und die Sekunde gegründete sogenannte absolute Krafteinheit hergeleitet (1 Dyn für die Beschleunigung von 1 cm in der Sekunde bei der Masse von 1 ccm Wasser oder 1 Gramm. Näheres vgl. Bd. II). Unter Benutzung dieser Kraft als V e r g l e i c h s e i n h e i t bei den ponderomotorischen Antrieben zwischen zwei sog. magnetischen Massen bezw. Magnetpolen ergab sich weiterhin die auf jene absolute Krafteinheit bezogene Einheit der magnetischen Masse bezw. der Einheitspol. Diesem „absoluten" Einheitspol entsprach ein absolutes Einheitsfeld. Das erdmagnetische Feld in diesen „absoluten" Einheiten ausgedrückt lieferte alsdann den e i n e n Antriebsfaktor bei POUILLETS Tangentenbussole in absolutem Masse (die Horizontalintensität H des Erdfeldes, auf Dyn bezogen in unseren Breiten etwa 0,2). Durch Vergleichung des absoluten Erdfeldwertes und des auf Einheitsentfernung reduzierten Stromfeldes mit Hülfe der Ausschlagstangente (vgl. oben) gelang es WEBER die zur Erzeugung jenes Stromfeldes erforderliche Stromstärke experimentell zu ermitteln, d. h. die Stromstärkeeinheit im sogenannten absoluten Masssystem (zu 10 Ampère) festzustellen. Die Ersetzung des Magneten durch eine Leiterwicklung, d. h. die Anwendung zweier senkrecht zu einander angeordneter Stromfelder führte ihn zu seinem absoluten Dynamometer. Dieses auf der Wechselwirkung von strömender Elektrizität und Magnetismus beziehungsweise von zwei kontrastierenden Stromfeldern (vgl. 40) aufgebaute Masssystem wurde als elektromagnetisches von dem elektrostatischen unterschieden, welch letzteres unter Zugrundelegung jener nämlichen absoluten Krafteinheit Dyn und der ponderomotorischen Wirkung gespannter r u h e n d e r Elektrizität, das ist zweier kontrastierender elektrischer Felder, die Einheit der Elektrizitäts m e n g e festsetzt. Da der elektrische Strom gleichfalls durch eine Elektrizitäts m e n g e gemessen wird, nämlich diejenige, welche in e i n e r Sekunde jeden Kreislaufquerschnitt durchsetzt, so müssen jene beiden in einem Verhältnis zueinander stehen. Letzteres fand sich durch die sogenannte kritische Geschwindigkeit $v = 3 \cdot 10^{10}$ cm, gleichzeitig — wie wir heute wissen — die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Elektrizität und des Lichtes, gegeben. Jene Arbeiten von GAUSS und WEBER sind für die Elektrophysik deshalb so bedeutungsvoll, weil sie einmal das noch heute gültige Masssystem schufen (vgl. Bd. II) und ein zweitesmal jener bedeutungsvollsten Entdeckung der nächsten Periode vorarbeiteten, welche durch die theoretisch zuerst von MAX-

WELL behauptete, experimentell von HERTZ erwiesene Wesensgleichheit der optischen und elektrischen Fortpflanzungsphänomene in der elektromagnetischen Lichttheorie die Verbindung zwischen diesen beiden grossen Gebieten der Physik herstellte. (Näheres vgl. **35**, sowie H. I, 2 und H. I, 3.)

Weitere Abänderungen der Tangentenbussole, wie die Einrichtung zur Drehung der Stromwindung um eine horizontale Achse von NEWANDER (1843), sowie die Verschiebung der Nadelebene in der Windungsachse parallel zur Windungsebene durch HELMHOLTZ (1849) und GAUGAIN (1853), hatten im ersten Fall Erweiterung der Messgrenzen, in den beiden letzteren die Verringerung der Abweichung von dem streng nur für eine unendlich kurze Nadel gültigen Tangentengesetz zum Ziel.

Die Auffindung eines elektrochemischen Strommasses, sowie die Angabe eines — heute als Wasservoltameter bekannten — Messapparates durch FARADAY (1834) wurde schon (vgl. **25**) erwähnt. Als Stromeinheit wurde deshalb vielfach bis zur Einführung der absoluten Einheiten durch WEBER die Stromstärke benutzt, welche in der Zeiteinheit 1 cm^3 Knallgas entwickelt, oder auch die Stromstärke in *mg* zersetzten Wassers angegeben. Das cm^3 Knallgas wurde namentlich von JACOBI vielfach benutzt, welcher (1839) das FARADAYsche Gesetz nachprüfte, zwischen 0,2 bis 77 cm^3 Knallgas in der Minute gültig fand und die Aichung der Bussolen mit Hülfe dieser Einheit empfahl zum Zweck der bisher fehlenden allgemeinen Vergleichbarkeit von Messresultaten, die mit verschiedenen Instrumenten gewonnen waren. Die Zersetzung von Metalllösungen wurde zur Strommessung zuerst von A. C. BECQUEREL (1837, P. A. 42, 307) angewendet, wodurch die spätere Ausbildung des Kupfer- und Silbervoltameters angeregt wurde. Zur Nachprüfung des elektrolytischen Gesetzes und des elektrochemischen Äquivalentgewichtes, welches er unabhängig von der Konzentration fand, bediente er sich als Stromstärkemesser einer von ihm konstruierten elektromagnetischen Wage. Diese erste Stromwage bestand aus einem zweiarmigen Waghebel mit angehängten permaneten Magneten. Unter diesen befanden sich die beiden Spulenwicklungen, welche derart vom zu messenden Strom durchflossen wurden, dass der dem Magneten erteilte Antrieb auf beiden Seiten des Doppelhebels entgegengesetzte Richtung hatte. Die summierten Antriebe wurden durch Gewichte ausbalanciert und die Stromstärke so in mechanischen Einheiten gemessen. Ein anderes Differentialinstrument, welches namentlich für die Widerstandsmessungen als Nullinstrument wichtig wurde, bildet das Differentialgalvanometer.

29. Ausbildung der galvanischen Messmethoden.

Die erste und nächstliegende Methode zur Widerstandsmessung, richtiger Widerstandsvergleichung, gab OHM (1826) an. Aus seinem neuaufgestellten Gesetz $I = \frac{E}{R_c + R_x}$ folgte, für konstante Spannung E und unveränderlichen Restwiderstand R_c des Stromkreises, dass zwei nacheinander eingeschaltete Widerstände R_m bezw. R_x alsdann gleich sind, wenn die Stromstärke bezw. der Nadelausschlag in beiden Fällen unverändert bleibt. Diese Vertauschungs-Methode wird aber bei Inkonstanz der wirksamen Spannung bezw. EMK ungenau. Von diesem Fehler unabhängig ist die im gleichen Jahr von A. C. BECQUEREL angegebene Methode mit gleichzeitiger Einschaltung der beiden zu vergleichenden Widerstände und Ausbalancierung der Nadelantriebe durch Anwendung zweier Galvanometerwicklungen mit gleich starker, aber entgegengesetzt gerichteter Feldwirkung. Dieses namentlich von A. E. BECQUEREL (Sohn) ausgebildete und als Differentialgalvanometer bezeichnete In-

strument diente ihm zur ersten einwurfsfreien Messung von Flüssigkeitswiderständen (1846) unter Elimination des scheinbaren Widerstandes der Polarisations-Gegenspannung (vgl. **27**), indem er verschieden lange Säulen derselben Flüssigkeit in beide Zweige einschaltete und zur Messung des Widerstandes die Differenzlänge durch bekannten Drahtwiderstand ersetzte. Die Verbesserung von Horsford (1847) bestand nur in Vermeidung der Störungen infolge aufsteigender Gasblasen durch horizontale Anordnung der Flüssigkeitssäule. Die weitaus wichtigste Anwendung oder Messschaltung auf diesem Gebiete bildete aber die Anordnung der Brückenschaltung durch Wheatstone (1844, P. A. 62, 535), welche er „Differenzialgalvanometer" bezeichnete, vermutlich wegen ihrer Eigenschaft die erzielte Widerstandsabgleichung durch Nullstrom, d. h. Abwesenheit von Spannungsdifferenz an den Enden des Galvanometers anzuzeigen. Von den späteren Abänderungen ist namentlich die Ersetzung zweier Widerstandszweige durch einen Gleitdraht mit verschiebbarem Schneidekontakt, sowie die von Thomson vorgenommene Verdoppelung des Brückenprinzips zur Elimination der Zuleitungswiderstände bei kleinen Widerstandswerten wichtig (vgl. **42**).

Aus den von Ohm auf Grund seines Gesetzes gezogenen Folgerungen ergab sich auch das erste Verfahren zur Messung der elektromotorischen Kraft (E) einer Stromquelle als Funktion einer Widerstandsänderung von bekannter Grösse ($R_1 - R_2$) und der beiden vorher ($E = I_1 \cdot R_1$) und nachher ($E = I_2 \cdot R_2$) vorhandenen Stromstärken zu $E = \frac{I_1 I_2}{I_2 - I_1}(R_1 - R_2)$. Aus Ohms Gesetz folgt nämlich

$$I_1 = \frac{E}{R_1} \qquad I_2 = \frac{E}{R_2}$$

oder

$$I_2 E = I_2 I_1 R_1$$

$$I_1 E = I_1 I_2 R_2$$

$$E(I_2 - I_1) = I_1 I_2 (R_1 - R_2)$$

$$E = \frac{I_1 I_2}{I_2 - I_1}(R_1 - R_2).$$

Die Hauptfehlerquelle, welche bei allen nach einander erfolgenden, d. h. ein Zeitintervall benötigenden Beobachtungen zur Ermittelung eines Wertes in der Inkonstanz der EMK liegt, haftet sowohl dieser Methode an als auch der von Fechner (1829) angegebenen. Letzterer leitet aus Summenschaltung ($E_1 + E_2$) und Differenzschaltung ($E_1 - E_2$) zweier zu vergleichender EMKK bei unbekanntem, aber konstant gelassenem Widerstand R des äusseren Stromkreises das Verhältnis aus Summen- (I_1) und Differenzstromstärke (I_2) ab zu

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{I_1 + I_2}{I_1 - I_2}$$

aus

$$E_1 + E_2 = I_1 R$$

$$E_1 - E_2 = I_2 R$$

$$2 E_1 = R(I_1 + I_2)$$

$$2 E_2 = R(I_1 - I_2)$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{I_1 + I_2}{I_1 - I_2}.$$

Eine brauchbare Momentanvergleichung zweier Spannungsdifferenzen, wobei die kleinere kompensiert, d. h. durch eine gleich grosse Gegenspannung an einer Stromlieferung verhindert wird, was namentlich für polarisierbare Stromquellen wichtig ist, wurde durch POGGENDORFS Kompensationsmethode (1841, P. A. 52, 511), namentlich in der durch DU BOIS REYMOND vereinfachten und verbesserten Form (1862) geliefert. (Weiteres vgl. Bd. II). Für die Bestimmung und Vergleichung von Spannungsdifferenzen oder EMKK, ohne dass ein auf die zu messende Spannungsdifferenz rückwirkender und alsdann leicht fälschender Dauerausgleich in Gestalt der Messstromstärke benötigt wird, würden in erster Linie die ponderomotorischen Wirkungen der elektrostatischen Messinstrumente, wie der längst bekannten Elektroskope und Elektrometer, geeignet erscheinen. Bis zu jener Zeit war aber deren Ausbildung noch nicht so fortgeschritten, dass sie für jene kleinen in Frage kommenden Spannungsdifferenzen empfindlich genug gewesen wären. Erst die Anforderungen des fortgesetzten Kampfes zwischen Kontakttheorie und elektro-chemischer Theorie der galvanischen Spannungserzeugung verlangten später dringend eine Verfeinerung solcher Messinstrumente bis zur Messung der elektrochemischen Elementar-Spannungserscheinungen. Diese weitere Entwickelung der Elektrometer knüpft an ein von DELLMANN (1843) konstruiertes Instrument an, welches von R. KOHLRAUSCH sehr vervollkommnet zunächst zu dem von ihm (1848, P. A. 75, 88 u. 220) gegebenen Nachweis benutzt wird: „Die elektromotorische Kraft ist der elektroskopischen Spannung an den Polen der geöffneten Kette proportional," eine Arbeit, welche namentlich die OHMschen Ansichten und Schlüsse bestätigt. Die Weiterentwickelung der elektrostatischen Messapparate, namentlich durch W. THOMSON, gehört der folgenden Periode an.

30. Auffassung der elektromagnetischen Erscheinungen.

Auch in dieser Periode stand die Auffassung der elektrischen Erscheinungen in ihrer Weiterentwickelung noch teilweise unter dem Zeichen des Problems der galvanischen Spannungserregung, namentlich soweit FARADAYS Anschauungen als die für die ganze Periode wichtigsten in Frage kommen. Andererseits war aber durch OERSTEDTS und seiner Nachfolger Entdeckungen ein gänzlich neues, rein physikalisches Moment hinzugekommen, welches geistige Verarbeitung in Gestalt einer Auffassung bezw. Vorstellung verlangte, da ein einfaches Begnügen mit den nackten Thatsachen dem menschlichen Geiste meistens widerstreitet. Interessant ist hierbei folgender Umschwung in der Auffassung, bedingt durch die in 23 mitgeteilte Reihenfolge der Entdeckungen. Die Ablenkung der Magnetnadel durch den elektrischen Strom verursachte wegen der seither gewohnten Erscheinung solcher ponderomotorischer Wirkungen zwischen zwei Magneten eine gleichsam magnetische Auffassung des elektrischen Stromes. Deutlicher noch als in der Vorstellung des „elektrischen Konfliktes" OERSTEDTS kommt dies in den Vorstellungen SEEBECKS, namentlich in seiner Arbeit „über den Magnetismus der galvanischen Kette" (1821) zum Ausdruck. Dies lässt bereits der Titel, mehr noch der erste Satz erkennen: „durch die in der Geschichte des Magnetismus epochemachende Entdeckung OERSTEDTS haben wir den Magnetismus in einer neuen, vorher unbekannten Form kennen gelernt; es hat sich zugleich aus den von OERSTEDT entdeckten Thatsachen ergeben, dass ein festes Verhältnis zwischen der elektrischen und magnetischen Polarisation in den galvanischen Ketten bestehe". Ja SEEBECK nennt den stromdurchflossenen Draht direkt einen elektrisch-chemischen Magneten, und der überall von ihm

angebrachte Zusatz „magnetisch" wirkt an verschiedenen Stellen direkt verwirrend und den eigentlichen Sinn verdunkelnd. Ähnliche von ERMAN entwickelte Auffassungen, sowie die in England von WOLLASTON vertretene, dass die Achse des Stromes von strömendem Magnetismus umkreist sei, wurden aber alsbald von der AMPÈREschen Auffassung verdrängt, welche gewissermassen eine Umkehrung darstellte. Durch seine Entdeckung, dass dieselben ponderomotorischen Wirkungen auch von stromdurchflossenen Leitern ohne Gegenwart jedes Magneten zu erzielen waren, sowie infolge ARAGOs Entdeckung des im weichen Eisen durch elektrische Ströme hervorgerufenen temporären Magnetismus, wurde er veranlasst den elektrischen Strom als das Primäre oder die Ursache, das magnetische Feld, sowie auch jeden Magneten selbst, als das Sekundäre oder die Wirkung anzusehen und nunmehr eine elektrische Theorie der Magnete zu entwickeln gegenüber jener gleichsam magnetischen Theorie des Stromes. Anfangs (1820) fasste er daher jeden Magnet, unter anderem auch die Erde, als in seinem Querschnitt von elektrischen Kreisströmen umflossen auf, später (1821 und 1822) gab er auf Grund von Experimenten mit Stahlmagneten die Annahme von Kreisströmen rund um den ganzen Querschnitt auf und ersetzte dieselbe durch die Annahme von Molekularströmen, und zwar sollen diese elektrischen Molekularströme in den Molekülen von Eisen, Kobalt und Nickel schon vor der Magnetisierung bestehen, aber ungerichtet, und durch den Magnetisierungsstrom nur eine gemeinsame Richtung erfahren. Diese Molekularströme werden ausdrücklich als die einzige Ursache aller magnetischen Erscheinungen bezeichnet. Diese Auffassung der Molekularmagnete blieb, abgesehen von einigen Modifikationen, bis in die neuere Zeit die herrschende. Im wesentlichen gilt dies auch von der durch AMPÈRE angenommenen positiven Stromrichtung, wenn auch die Stromvorstellungen selbst meist recht unklar erscheinen, so namentlich die AMPÈRES von zwei entgegengesetzt im Leiter verlaufenden Strömungen, welche offenbar durch die herrschende SYMMERsche Theorie verursacht wurde. Dass FARADAY mit seinem besonders ausgeprägten Klarheitsbedürfnis sich hierbei nicht beruhigte, ist erklärlich, doch erscheinen seine Ausführungen nach dieser Richtung besonders beachtenswert und mögen daher im Wortlaut folgen (vgl. Exp. Res. Bd. I):

283. Unter Strom verstehe ich irgend ein Fortschreitendes, sei es nun ein elektrisches Fluidum oder zwei in entgegengesetzter Richtung sich bewegende Fluida, oder blos Schwingungen, oder, noch allgemeiner gesprochen, fortschreitende Kräfte. Unter Anordnung verstehe ich eine örtliche, nicht progressive Verteilung von Partikeln, oder Fluidis oder Kräften. Noch viele andere Gründe liessen sich für die Ansicht, dass ein Strom etwas anderes sei als eine Anordnung, geltend machen, allein ich vermeide ängstlich jede unnötige Auslassung, die anderen sofort einfallen wird.

511. Indem ich von dem Strome spreche, sehe ich mich genötigt, noch umständlicher als bei einer früheren Gelegenheit (283) zu sein, da hierin die Ansichten der Physiker sehr verschieden sind, obwohl sie alle hinsichtlich der Wirkung des Stromes selbst übereinstimmen. Andere nehmen zwei elektrische Fluida an, und hierbei kommen sonderbare Abweichungen zum Vorschein.

512. RIFFAULT und CHOMPRÉ z. B. nehmen an, dass der positive wie der negative Strom Zersetzung bewirke und behaupten, dass der positive Strom kräftiger sei als der negative, indem unter sonst gleichen Umständen salpetersaures Natrium von dem ersteren zersetzt werde, von dem letzteren aber nicht.

513. HACHETTE behauptet, dass „für die Wasserzersetzung die gleichzeitige Wirkung der Elektrizitäten, der positiven und negativen, nicht notwendig ist, wie man geglaubt hat." Dieser Satz, wenn anders ich seinen Sinn richtig erfasst habe, involviert, dass man die eine Elektrizität unabhängig von der anderen erhalten und zu Zersetzungen verwenden kann.

514. Die Ansicht von DE LA RIVE stimmt bis zu einem gewissen Grade mit derjenigen HACHETTES überein, denn er nimmt an, dass die beiden Elektrizitäten gesonderte Teile von Wasser zersetzen (490). An einer Stelle spricht er von den beiden Elektrizitäten als von zwei Influenzen, vielleicht, weil er es vermeiden wollte, eine entschiedene Meinung über die unabhängige Existenz elektrischer Fluida zu äussern; da aber diese Influenzen mit den in Freiheit gesetzten Elementen vermöge einer Art chemischer Affinität in Verbindung treten und für die Dauer derselben ihren Charakter gänzlich verhüllen, so leidet diese Vorstellung an grosser Unbestimmtheit, da eine solche Art von Verbindung nur denkbar ist zwischen Dingen, die eine unabhängige Existenz haben. Die beiden elementaren, in entgegengesetzten Richtungen von Pol zu Pol sich bewegenden elektrischen Strömungen sollen den gewöhnlichen VOLTAschen Strom konstituieren.

515. GROTTHUS neigt zu der Meinung, dass die Elemente des Wassers bei ihrer Trennung an den Polen sich mit den Elektrizitäten verbinden und so zu Gasen werden. DE LA RIVE hat genau die umgekehrte Ansicht, der zu Folge sie während ihres Durchganges durch die Flüssigkeit mit den Elektrizitäten verbunden sind und bei ihrem Freiwerden an den Polen deselektrisiert werden.

516. Ich habe unter den mannigfachen Versuchen, welche zur Stütze dieser Ansichten angeführt werden oder mit elektrochemischen Zersetzungen oder elektrischen Strömungen in Zusammenhang stehen, nachgeforscht, ob sich darunter einer finde, welcher mehr für die Theorie von zwei Elektrizitäten als für die von einer Elektrizität spreche, aber ich war nicht imstande eine einzige Thatsache zu entdecken, welche hierfür ins Feld geführt werden könnte. Noch weniger vermochte ich vom Standpunkte der Hypothese von zwei Elektrizitäten den geringsten Grund zu der Annahme zu erkennen, dass in einem Strome die eine Elektrizität kräftiger sein könne als die andere, oder die eine ohne die andere vorhanden sein, oder auch nur im geringsten Mass sich ändern könne, ohne dass eine entsprechende Änderung der anderen stattfände. Wenn unter Voraussetzung von zwei Elektrizitäten ein Strom der einen ohne die andere erhalten oder der Strom der einen mehr gestärkt oder geschwächt werden könnte als der der anderen, so dürften wir mit Sicherheit eine Veränderung der chemischen oder magnetischen Wirkungen oder beider zugleich erwarten, aber solche Veränderungen sind nicht beobachtet worden. Wenn ein Strom so geleitet wird, dass er in einem Teil seiner Bahn eine chemische, in einem anderen eine magnetische Wirkung ausübt, so findet man stets, dass beide Wirkungen gleichzeitig auftreten. Meines Wissens kennt man keinen Strom, welcher chemisch wirkte und nicht auch magnetisch, oder welcher auf einen Magnet wirkte und nicht zu gleicher Zeit chemisch.

517. Bloss nach den Thatsachen zu urteilen, liegt bisher nicht der mindeste Grund vor, das Agens, welches in dem, was wir elektrischen Strom nennen — gleichviel ob dabei Metalle in Betracht kommen oder geschmolzene Körper oder feuchte Leiter oder selbst Luft, die Flamme und dünne elastische Media — vorhanden ist, als ein zusammengesetztes oder kompliziertes anzusehen. Es ist niemals in einfachere oder elementare Agentien aufgelöst worden und lässt sich vielleicht am besten vorstellen als die Achse einer aus entgegengesetzten, genau gleich grossen, aber entgegengesetzt gerichteten Kräften bestehenden Gesamtkraft.

1617. Das Wort Strom ist im gewöhnlichen Sprachgebrauch so bezeichnend, dass wir, wenn wir es auf Betrachtungen elektrischer Erscheinungen anwenden, es kaum genugsam seiner Bedeutung entkleiden oder uns hüten können in unserem Urteil nicht befangen zu werden (283, 511). Ich werde es in seinem gewöhnlichen elektrischen Sinne gebrauchen, nämlich als allgemeinen Ausdruck für einen gewissen Zustand und eine gewisse Beziehung der als fortschreitend vorausgesetzten elektrischen Kräfte.

1618. Ein Strom wird sowohl durch Erregung als auch durch Entladung erzeugt, und wie man auch diese beiden allgemeinen Ursachen abändern mag, die Wirkung bleibt dieselbe. So kann Erregung in mehrfacher Weise erfolgen, durch Reibung, chemische Wirkung, Wärmewirkung, Zustandsänderung, Induktion u. s. w., und Entladung kann in Form von Leitung, Elektrolysierung, disruptiver Entladung und Konvektion auftreten; dennoch scheint der Strom, wenn er bei diesen Vorgängen auftritt, allemal derselbe zu sein. Diese Beständigkeit in dem Charakter des Stromes, ungeachtet der grossen und besonderen Mannigfaltigkeit in der Art seines Auftretens, ist ungemein auffallend und wichtig, und die Erforschung und Aufhellung derselben verspricht den zugänglichsten und vorteilhaftesten Weg zu bieten zu einem wahren und tiefen Verständnis der Natur der elektrischen Kräfte.

Den „Strom durch Erregung" würden wir heute als dielektrischen Verschiebungsstrom bezeichnen, der sich als Ladestrom bei Gleichspannung nur durch seine kurze Dauer von den „Entladungsströmen" unterscheidet. Der engere Anschluss OHMS an die Wasserstromvorstellungen scheint aus der Einführung des Ausdrucks „Gefälle" für die Differenz der Spannung auf die Längeneinheit bezw. die „reduzierte" Länge in seinem Hauptwerk (1827 die galvanische Kette) hervorzugehen. Im Zusammenhang hiermit gewinnt auch die Schlussstelle der Arbeit von R. KOHLRAUSCH bei seiner 1849 (P. A. 78, 1) vorgenommenen Nachprüfung und Bestätigung von OHMS Gesetz erhöhtes Interesse; die hierbei benutzte Bezeichnung „Triebkraft" für EMK sei nebenbei erwähnt.

Man sieht, das ganze Gebäude ist auf die Annahme basiert, dass der elektrische Strom in einer wirklichen Fortbewegung der Elektrizität von Querschnitt zu Querschnitt in der Kette besteht, es steht und fällt mit dieser Annahme. Mag aber auch an der Richtigkeit dieser gezweifelt werden, ein inniger Zusammenhang zwischen dem Strome und der Verteilung der elektroskopischen Elektrizität durch die ganze Ausdehnung der Kette ist schon deswegen vorhanden, weil beide in gleicher Weise von den reduzierten Längen abhängig sind, und dieser Zusammenhang, welcher auf Thatsachen beruht, bleibt bestehen, auch wenn man das Wesen des Stromes nicht mehr in der wirklichen Fortbewegung der Elektrizität erblickt.

Im engen Zusammenhang mit der Stromvorstellung steht die Auffassung über die Leitung, sowie auch weiterhin über die dielektrischen Vorgänge. Der erste, welcher hierüber eine bestimmte Auffassung entwickelte, war wiederum FARADAY. Er fasst auf Grund seiner Versuche (Exp. Res. XII u. XIII) Leiter, Elektrolyte und Isolatoren unter demselben Gesichtspunkt zusammen und will nur graduelle Unterschiede anerkennen, wenn auch das Zahlenverhältnis noch so gross ist. Bei Gasen soll ein allmählicher Übergang von völliger Isolation („ungeschwächte Induktion" hier im elektrostatischen Sinne, also der Influenz entsprechend) bis zum Beginn der sogenannten Konvektion bei höherer Spannung, d. h. Nachgeben und Beginn der Leitung stattfinden. Namentlich wird von ihm der Prozess der „elektrolytischen Entladung" als ein Vorgang angesehen, der im wesentlichen identisch ist mit demjenigen der Entladung durch Konvektion, eine Vorstellung, die namentlich durch die neueren Strahlungserscheinungen Wahrscheinlichkeit und Interesse gewinnt (vgl. Exp. Res. 1622). So sagt er:

1624. Wenn demnach ein Luft- oder Staubteilchen, an einer negativen Spitze elektrisiert, unter dem Einfluss der Induktionskräfte (1572) zur nächsten positiven Fläche wandert und nach der Entladung sich entfernt, so scheint mir dies genau derselbe Vorgang zu sein, wie wenn ein in dem Elektrolyt negativ gewordenes Sauerstoffteilchen durch dieselbe Disposition der Induktionskräfte fortgedrängt wird, zur positiven Platinelektrode wandert, hier entladen wird und sich dann fortbegiebt, wie es vorher die Luft oder der Staub that.

Bei allen Ausgleicherscheinungen hält er „Induktion" (wieder im obigen Sinne) für den notwendigen Vorläufer der Entladung. Diese Vorstellung schliesst bereits den Hauptunterschied gegen die bisher vorstellungslose Auffassung einer Fernwirkung bei der Influenzelektrizität ein und nimmt eine durch die Zwischenschicht des Dielektrikums fortschreitende, also Zeit benötigende „successive Polarisierung" an.

1686. Der Polarisationszustand bei gewöhnlicher Induktion kann als ein Zwangszustand aufgefasst werden, aus welchem die Teilchen in ihren Normalzustand zurückzukehren streben. Er lässt sich wahrscheinlich durch Annäherung induzierender und in-

duzierter Körper oder durch andere Umstände auf einen sehr hohen Grad steigern, und die Vorgänge bei der Elektrolysierung (861, 1652, 1706) scheinen darzuthun, dass die Menge des Agens, welches sich so auf einem einzelnen Teilchen anhäufen kann, ungeheuer gross ist. In Zukunft werden wir vielleicht imstande sein, Korpuskularkräfte, wie die der Schwere, Kohäsion, Elektrizität und chemischen Affinität miteinander zu vergleichen, und auf diese oder jene Weise aus ihren Wirkungen ihre relativen Äquivalente abzuleiten; gegenwärtig vermögen wir es nicht, allein es scheint kein Grund vorhanden zu sein, zu zweifeln, dass unter ihnen die elektrischen Kräfte, welche zugleich die chemischen Kräfte sind (891, 918), bei weitem die mächtigsten sind.

Diese Vorstellung erfährt für quantitative, also mathematische Behandlung eine Ergänzung durch die elektrostatischen Drucklinien bezw. Induktionslinien, welche man sich zwischen den mit notwendigerweise gleich grossen, aber entgegengesetzten elektrischen Ladungen versehenen Leiterflächen durch das trennende Dielektrikum hindurch verlaufend denkt, d. h. die Darstellung des elektrostatischen Feldes durch die Dichte und den Verlauf jener Linien. Die Folgerungen dieser Auffassung führen aber auch rein anschaulich ohne Aufwendung eines Apparates von mathematischen Hülfsmitteln zu denselben Haupt- bezw. Endergebnissen, wie die Ableitungen der Potentialtheorie, so z. B. die Ersetzbarkeit der innerhalb eines Raumes befindlichen sogenannten elektrischen Massen in ihrer Wirkung nach aussen hin durch eine elektrische Verteilung auf der Oberfläche, welche jenen Raum umspannt, oder die Gleichheit der beiden influenzierten Elektrizitätsmengen auf einem isolierten Leiterkörper, welcher in ein elektrostatisches Feld gebracht wird.

31. Mathematische Behandlung der Erscheinungen.

Wie schon erwähnt, blieb aber Faraday mit seinen Auffassungen lange Zeit ziemlich isoliert, woraus es sich erklärt, dass die herrschende Fernwirkungstheorie in der mathematischen Behandlung der Erscheinungen (zunächst der elektrostatischen und magnetischen) die Hülfsmittel verwandter Gebiete, wie der Gravitation, heranzog, und dass in Anlehnung an dieselbe die Darstellung der elektrophysikalischen Beziehungen den Schwerpunkt ihrer Entwickelung auf analytisches Gebiet und besonders auf jene mit der Gravitation verwandte Seite verlegte, wo er auch bis in die neuere Zeit verblieb. Hier war es namentlich die Potentialtheorie, welche der theoretischen Elektrizitätslehre eine sehr nachhaltige Anregung gewährte.

Poisson hatte (vgl. 15) die Messresultate Coulombs theoretisch gefasst mit Hülfe der Übertragung der Laplaceschen Funktion

$$V = \Sigma \frac{m}{l} = \iiint \frac{\varrho \cdot dx \cdot dy \cdot dz}{l}$$

aus der Gravitationstheorie auf das elektrische Gebiet, unter Ersetzung der gravitierenden Masse m durch Elektrizitätsmenge, bezw. der Massendichte ϱ durch die elektrische Dichte im Volumelement $dx \cdot dy \cdot dz$, welches von dem ausserhalb gelegenen Aufpunkt die Entfernung l besitzt; gleichzeitig hatte er jedoch gezeigt, dass die sogenannte Laplacesche Gleichung

$$\triangle V = 0,$$

wenn $\triangle$ für

$$\frac{d^2 V}{dx^2} + \frac{d^2 V}{dy^2} + \frac{d^2 V}{dz^2}$$

steht, für Punkte innerhalb einer geschlossenen Oberfläche mit sogenannter freier Elektrizität den Wert $-4 \pi \varrho$ annimmt.

Eine von GREEN (1828) erschienene Arbeit (vgl. CRELLES Journal, Bd. 39, 73; Bd. 44, 536; Bd. 47, 161) entwickelte unter Einführung des Namens Potentialfunktion für V diese mathematischen Ableitungen weiter, namentlich unter Benutzung eines nach GREEN benannten funktionstheoretischen Satzes. Diese für die Potentialtheorie grundlegende Arbeit blieb aber lange völlig unbeachtet, um erst 1850 von THOMSON wieder ausgegraben zu werden, sodass die zu ganz ähnlichen Ergebnissen führenden Arbeiten von GAUSS (1839) völlig unabhängig von jener entstanden. Die Funktion V, aus welcher er die Antriebskraft

$$p = \sqrt{\left(\frac{dV}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dV}{dy}\right)^2 + \left(\frac{dV}{dz}\right)^2} \text{ ableitet,}$$

nennt jedoch GAUSS Potential.

Heut ist es üblich nach CLAUSIUS zur Vermeidung von Irrtümern so zu unterscheiden, dass unter Potential der Arbeitswert des ganzen Systems, d. h. die aufzuwendende Arbeit bei Verbringung aller in Betracht kommenden Massen aus der Neutralität, der sogenannten unendlichen Entfernung, in ihre der Betrachtung unterworfene Lage verstanden wird, also

$$V = \sum_{a=1}^{a=n} \sum_{b=1}^{b=m} \frac{m_a' \, m_b''}{l_{ab}}$$

wenn $m_1' \cdots m_n'$ die Massen des einen Systems a, $m_1'' \cdots m_m''$ die Massen des anderen Systems b und l_{ab} ihre gegenseitigen Entfernungen sind, während unter „Potentialfunktion“ der Wert

$$V_1 = \sum_{a=1}^{a=n} \frac{m_a'}{l_a}$$

verstanden wird, welcher sich auf die Masseneinheit, also $m'' = 1$ bezieht, sodass V_1 die Arbeit ist bei Verbringung der Masseneinheit aus der Neutralität bis zu dem betrachteten Punkte im Raum, für welchen die Potentialfunktion jenes Systems a zu ermitteln ist.

Die weitere Entwickelung dieses mathematischen Hülfsmittels erfolgte namentlich durch DIRICHLET, RIEMANN und W. THOMSON, welcher die Methode der sphärischen Spiegelung erdachte. Auch KIRCHHOFF bediente sich 1845 (P. A. 64, 497) bei Untersuchung der Strömungen in Scheiben und bei anderen Gelegenheiten mit Vorteil dieses Hülfsmittels. Eine besonders ausgedehnte Verwendung fand dasselbe auch in dem Ausbau der Theorie des Magnetismus durch die Schule der theoretisch-mathematischen Physiker, welche sich an die Göttinger Gelehrten anschlossen. In der mathematischen Behandlung der entsprechenden elektrischen Erscheinungen thaten sich gegen Schluss der Periode namentlich W. WEBER und C. F. NEUMANN hervor, wobei ersterer an die Arbeiten von COULOMB und AMPÈRE anschliessend alle elektrischen Erscheinungen vom Standpunkte der Fernwirkungstheorie durch ein einheitliches Gesetz, das WEBERsche Gesetz (vgl. 97) darzustellen versuchte, nicht ohne später auf heftigen Widerspruch bei HELMHOLTZ zu stossen. Fast gleichzeitig mit WEBER stellte (1845) GRASSMANN „eine neue Theorie der Elektrodynamik“ auf, deren scheinbare Abweichung von den Ergebnissen AMPÈRES später (1870)

durch STEPHAN Aufklärung erfuhr. Alle diese eigentlich in den letzten Abschnitt dieses Bandes fallenden mathematischen Ableitungen seien hier nur kurz erwähnt, zumal sie gegenwärtig gegenüber der elektromagnetischen Theorie nur mehr mathematisches Interesse besitzen.

Vermutlich würde auch trotz der Schwierigkeit der Begriffe und der Aufwendung eines grösseren Apparates höherer Mathematik die allgemeinere Verwendung des Potentialhülfsmittels in die Elektrotechnik herübergenommen worden sein, wenn hierzu irgend ein Bedürfnis bestanden hätte. Ein solches lag aber nicht vor, vielmehr liessen die technisch wichtigen elektrischen Ausgleicherscheinungen sich durch den weiteren Ausbau der von OHM aufgestellten Beziehungen einfacher und übersichtlicher darstellen und haben hier sowohl die Begriffe als Nomenklaturen der Potentialtheorie entbehrlich gemacht. Ausschlaggebend für die Vermeidung der Potentialverwendung war wohl mit der Umstand, dass jene das Gebiet des Magnetismus lange Zeit — wenigstens auf dem Kontinent — beherrschende Theorie mit ihren Vorstellungen der magnetischen Fluida bezw. Massen den Anforderungen der Elektrotechnik, speziell des Dynamobaues, durchaus nicht gerecht zu werden vermochte, während die von FARADAY entwickelten Vorstellungen der magnetischen Kraftlinien völlig den Bedürfnissen entsprachen. Als sich weiterhin herausstellte, dass diese praktisch einfache und bequem brauchbare Auffassung durch MAXWELL eine umfassende mathematisch-theoretische Ausbildung erfahren hatte, welche die bisherigen Fernwirkungstheorien entschieden übertraf, indem sie dem engen inneren Zusammenhang zwischen Elektrizität und Magnetismus gerecht wurde, fand diese von der Technik allgemein benutzte Auffassung auch in die Physik immer mehr Eingang, sodass auch hier die Potentialtheorie an vielen Stellen verdrängt worden ist.[1])

Die mathematischen Formulierungen der Verhältnisse des elektrischen Stromkreises liessen noch einige weitere, praktisch wichtige Ableitungen zu. So hatte OHM selbst bereits aus seinem Hauptgesetz die bei Leiterverzweigungen eintretenden Stromverhältnisse richtig gefolgert, indem er diese Parallelströme als umgekehrt proportional mit den Widerständen der Parallelleitungen angab. In etwas eleganterer Ableitung, sowie auch auf die WHEATSTONE-Drahtkombination erweitert, hat KIRCHHOFF im Jahre 1845 (P. A. 64, 513) die Verhältnisse bei Stromverzweigung behandelt, nachdem er die beiden nach ihm benannten Gesetze formuliert hatte: 1) Die algebraische Summe aller in einem Punkt zusammenlaufenden Ströme ist Null. 2) Bei Leitungen, welche eine geschlossene Figur bilden, ist die algebraische Summe aller EMK (eigentlich Teilspannungen) zwischen zwei Punkten auf verschiedenen Wegen dieselbe. Hieraus leitet er dann die von WHEATSTONE (vgl. 29) angegebenen, aber nicht bewiesenen Beziehungen zwischen den vier Widerstandszweigen ab, für den Fall, dass die Galvanometerbrücke stromlos ist.

---

1) Vgl. z. B. das Werk von EBERT über „Magnetische Kraftfelder", wo die Benutzung des Potentials, ohne der Behandlung Zwang anzuthun, so gut wie gänzlich vermieden ist; ferner H. I, 3 vom gleichen Verfasser.

Die Entwickelung der neueren Elektrophysik.

32. Charakterisierung der letzten Periode.

1850—1900. Es kann nicht die Absicht vorliegen, diese letzte Periode, welche unter dem Zeichen der Energiegleichungen steht, in ähnlich ausführlicher Weise zu behandeln, wie die vorausgegangenen; vielmehr wird es sich hier mehr darum handeln einerseits den allgemeinen Charakter der Periode zu kennzeichnen, andererseits die wesentlichsten Entwickelungszüge unter den bisher benutzten Gesichtspunkten anzugeben. An gewichtigen Gründen hierfür, welche diese Beschränkung unbedingt notwendig erscheinen lassen, wären folgende anzuführen: einmal die ausführlichere Darstellung der folgenden Abschnitte dieses Bandes mit dem Versuch, denjenigen Stoff der letzten Periode, welcher für den Elektriker auch im neuen Jahrhundert bedeutungsvoll bleibt, in anderer als geschichtlicher Anordnung darzustellen. Aber der Wunsch zu weitgehende Wiederholungen zu vermeiden war es nicht allein, hierzu kommt die rapid anwachsende Menge der Spezialforscher und des durch sie gelieferten Materials an Detailforschung, welche eine genauere entwickelungsgeschichtliche Behandlung des nach allen Richtungen hin erfolgenden weiteren Ausbaues der experimentellen und theoretischen Elektrophysik für den vorliegenden Fall ausschliesst. Unter folgendem Bilde charakterisierte Boltzmann diese Entwickelung in seiner überaus bedeutungsvollen Rede: „Über die Entwickelung der Methoden der theoretischen Physik in neuerer Zeit (vgl. 1899 Ph. Z., I, 60 u. ff.)“, welche von einem hohen Standpunkte aus das Facit des letzten halben Jahrhunderts zieht und die Sachlage hinsichtlich der verschiedenen Auffassungen und Darstellungen der Physik treffend kennzeichnet:

In den früheren Jahrhunderten schritt die Wissenschaft durch die Arbeit der erlesensten Geister stetig, aber langsam fort, wie eine alte Stadt durch Neubauten betriebsamer und unternehmender Bürger in stetem Wachstume begriffen ist. Dagegen hat das gegenwärtige Jahrhundert des Dampfes und Telegraphen sein Gepräge nervöser, überhastender Thätigkeit auch dem Fortschritte der Wissenschaft aufgeprägt. Namentlich die Entwickelung der Naturwissenschaft in neuerer Zeit gleicht mehr der einer modernsten amerikanischen Stadt, die in wenigen Decennien vom Dorfe zur Millionenstadt wird.

Die Folge dieser enormen, in rapidem Wachstume begriffenen Ausdehnung unserer positiven Kenntnisse war eine bis ins kleinste Detail gehende Arbeitsteilung in der Wissenschaft, welche fast schon an die in einer modernen Fabrik erinnert, wo der eine nichts als das Abmessen, der zweite das Schneiden, der dritte das Einschmelzen der Kohlenfäden zu besorgen hat u. s. w. Gewiss ist eine derartige Arbeitsteilung dem raschen Fortschritte der Wissenschaft enorm förderlich, ja für denselben geradezu unentbehrlich, aber ebenso gewiss birgt sie auch grosse Gefahren. Der für jede ideale, auf die Entdeckung von wesentlich Neuem, ja nur wesentlich neuen Verbindungen der alten Gedanken gerichtete Thätigkeit unerlässliche Überblick über das Ganze geht dabei verloren.

Die Hauptursache des rapiden Fortschrittes der Naturwissenschaft in der letzten Zeit liegt unzweifelhaft in der Auffindung und Vervollkommnung einer besonders geeigneten Forschungsmethode. Auf experimentellem Gebiete arbeitet dieselbe oft geradezu automatisch weiter, und der Forscher braucht nur gewissermassen stets neues Material aufzulegen, wie der Weber neues Garn auf den mechanischen Webstuhl. So braucht der Physiker nur immer neue Substanzen auf ihre Zähigkeit, ihren elektrischen Widerstand u. s. w. zu untersuchen, dann dieselben Bestimmungen bei der Temperatur des flüssigen Wasserstoffes, dann wieder des Moissanschen Ofens zu wiederholen, und ähnlich geht es bei manchen Aufgaben der Chemie. Freilich gehört immer noch genug Scharfsinn dazu, immer gerade die Versuchsbedingungen zu finden, unter denen die Sache geht.

Auf dem engeren Gebiet der elektrischen Wissenschaften steht mit dieser beschleunigten Entwickelung und der weitgehenden Arbeitsteilung die Abspaltung der wichtigen technischen Zweige in Zusammenhang. Aus dem gemeinsamen Stamm der vorausgegangenen Entwickelungsperioden sprossen dieselben in dieser Periode mit so kraftstrotzender Fülle, dass sich auch ihr wissenschaftliches Aufblühen immer selbständiger gestaltet und ihr Kontakt mit der verschwisterten neueren Elektrophysik, zum mindesten aber mit der Entwickelungsgeschichte auf dem Gebiete der spezielleren Forschungen als ein weniger enger erscheinen muss. Die Entwickelungsgeschichte der elektrotechnischen Weiterverzweigungen wird gleichfalls hier in Wegfall kommen, da sie sich in den einzelnen Abschnitten der folgenden Bände findet, und somit die Beschränkung auf die zuerst genannten Richtungen sich ergiebt. Überblickt man den Charakter dieser Periode und vergleicht sie mit der voraufgegangenen, so springt zunächst in die Augen, dass die Fundamente beim Eintritt in die neue Periode im wesentlichen vorliegen, sodass die letztere sich fast ausschliesslich dem Auf- und Ausbau widmen kann. Wenn auch qualitativ einige neue Erscheinungsseiten, namentlich nach der Seite der Optik hin, aufgedeckt und damit der Grund zu einem engeren Anschliessen an dieses Physikgebiet in Gestalt der Elektrooptik gelegt wird, so erscheinen die qualitativen Fundamente der engeren Elektrophysik doch durch die Forscher der letzten Periode im grossen und ganzen geliefert. Dies erklärt auch die Thatsache zur Genüge, dass der Schwerpunkt der wissenschaftlichen Leistungen in dieser Periode gegenüber den früheren sich mehr nach Seite der Klärung der Erscheinungen, also der Auffassung und Darstellung hin verlegt. Die in der vorigen Periode (vgl. **23—25**) bereits eingeleitete Bewegung vom Qualitativen zum Quantitativen tritt hier noch stärker hervor, was auch in der Abspaltung und Entwickelung der technischen Seiten zum Ausdruck gelangt. Für den vorliegenden Abschnitt gewinnt der vierte und fünfte Gesichtspunkt (vgl. Einleitung) sonach gegenüber dem ersten und zweiten relativ immer mehr an Bedeutung. Was die Auffassung der elektrischen Erscheinungen anlangt, so sind es namentlich zwei gedankliche Hauptstrassen und Bebauungsgebiete, welche aus der vorigen Periode herüberreichend immer mehr Wichtigkeit für die weitere Entwickelung gewinnen. Sie bieten ihren Bearbeitern immer bessere Bahnen zum Fortschritt, und führen, wenn auch in hartem Kampf gegen die schulmässig sanktionierte Auffassung endlich zur besseren, tieferen Erkenntnis der Erscheinungen, bis sie gegen Ende des Jahrhunderts die endgültige Lösung der beiden Fundamentalfragen in ihrem Sinne ermöglichen. Die eine liegt mehr nach der elektrochemischen Seite und entspringt dem alten Kampf um die galvanische Spannungserregung (Kontaktelektrizität) in Verbindung mit der Elektrizitätsleitung in Elektrolyten. Nach Durchdringung mit dem Energieprinzip, welches alle Gebiete der Naturwissenschaft ausgiebig befruchtete und einen Anstoss zu kräftigerer Entwickelung gab, wird unter Führung eines Clausius, Helmholtz, Arrhenius, Ostwald, Nernst die Dossciations- oder Jonisierungshypothese endlich der Schlüssel zu einer befriedigenden Lösung im Sinne der chemischen Auffassung dieser Erscheinungen. (Weiteres vgl. **83** u. ff.) Für den Elektrophysiker besass das zweite Gebiet mit der nunmehr festliegenden Hauptbegehungsstrasse aber noch grössere Wichtigkeit, da hier die Entscheidung über den Kernpunkt der elektro-mechanischen Auffassung der Erscheinungen noch ausstand, d. h. die Frage: Fernwirkungstheorie oder Feldtheorie? Diese gedankliche

Entwickelungsreihe erstreckte sich also auf die Auffassung bei Übertragung und Fortpflanzung der elektromagnetischen Energieformen in Isolatoren und Leitern und wird abgesehen von vielen anderen bedeutenden Mitkämpfern durch die Namen FARADAY, MAXWELL, HELMHOLTZ, HERTZ gekennzeichnet. Etwas früher — Ende der achtziger Jahre — als bei der vorhergehenden Reihe wurde hier durch HERTZ die experimentelle Entscheidungsschlacht geliefert, welche gleichzeitig auch der Feldtheorie zu einem entschiedenen und unangefochteneren Siege verhalf, als dies die Dissociationshypothese — bei ihrer allgemeineren Anerkennung Mitte der neunziger Jahre — für die chemoelektrische Auffassung der anderen Erscheinungen vermochte.

Neben diesen beiden wichtigen Fragen, welche die Kräfte der bedeutendsten Forscher auf dem Gebiete der Elektrophysik in Anspruch nahmen, trat zeitweilig ein anderes Erscheinungsgebiet etwas zurück, nämlich dasjenige der sogenannten Gasentladungen mit den diese begleitenden Strahlungen. Die Lösung jener Fragen machte hervorragende Arbeitskräfte frei und, was noch mehr ins Gewicht fallen dürfte, befruchtete durch die nunmehr gesicherten Vorstellungsweisen auch dieses dritte wichtige Erscheinungsgebiet. Seine Bedeutsamkeit offenbarte sich auch kurze Zeit nach der Lösung jener Fragen in Entdeckungen, welche für die Elektrophysik den Ausgang des 19. Jahrhunders als Zeitalter der Gasentladungen und Strahlungen und vermutlich als den Beginn einer neuen Entwickelungsperiode kennzeichnen. Diese dritte Entwickelungsreihe, durch Namen wie CROOKES, LENARD, RÖNTGEN gekennzeichnet, hat neben ihrer Bereicherung dieses Grenzgebietes der Elektrophysik zwar noch zahlreiche und wichtige Punkte dem neuen Jahrhundert als der Lösung bedürftig überwiesen, aber gleichzeitig die Überzeugung immer mehr und mehr gefestigt, dass weitere wichtige Aufklärungen über das Wesen der „Elektrizität“ wenn überhaupt, so in Verfolgung dieser Erscheinungen zu erwarten stehen. Hieraus erklärt es sich, dass die Vorgänge bei den Gasentladungen für die gegenwärtige Elektrophysik sich im Mittelpunkt des Interesses befinden.

Dass diese drei Richtungsstrassen allein zur Aufschliessung des reichen Inhaltes der Elektrizitätswissenschaft nicht genügten, ist klar, wenn auch die meisten übrigen Forschungen einen mehr oder weniger ausgesprochenen Zusammenhang mit einer derselben erkennen lassen. Vor allen Dingen bleibt aber noch ein Grenzgebiet, welches die Verbindung mit dem neben der Elektrophysik neu erstehenden Reich der Elektrotechnik vermittelt. Der Ausbau der zahlreichen Ansätze aus der vorausgegangenen Periode in Richtung einer Auswertung der elektrischen Energieform, sowohl für den Verkehr als überhaupt für bessere Lebensverhältnisse, tritt in dieser Periode zum erstenmal für die Allgemeinheit mehr in den Vordergrund. Männer wie WILLIAM THOMSON (jetzt Lord KELVIN), welcher sich namentlich um die Ausbildung der messtechnischen Seite sowie der Kabeltelegraphie (Syphon-Recorder) Verdienste erwarb, vor allem aber WERNER v. SIEMENS, welcher als der Vater der Starkstromtechnik und der erste Elektro*ingenieur* gelten kann, dürften die Hervorsprossung der technischen Abzweigung kennzeichnen. Die innere Kraft dieses Sprosses wurde nicht nur durch die allbekannte Geschwindigkeit ihrer Entwickelung bezeugt, sondern in fast noch höherem Grade durch die befruchtenden Anregungen, welche die von ihr geförderte technische Seite der Elektrizitätswissenschaft dem verschwisterten Zweige der *heutigen* Elektrophysik gewährte. Es sei in dieser Richtung nur an den Ausbau der

magnetischen und elektrischen Kreislauf-Beziehungen, wie sie der Dynamobau und die Wechselstromtechnik veranlassten, sowie die Verkettungserscheinungen, ferner an die Klärung der Hysteresiserscheinungen, die Betonung der energetischen Erscheinungsseiten, die Ausbildung der elektrischen Messinstrumente und so fort erinnert.

Die Behandlung der wichtigeren Entwickelungsmomente nach den eingangs erwähnten Gesichtspunkten möge diesen historischen Überblick abschliessen.

33. Spannungserzeuger mit Ausnahme der Dynamos.

Für die Erregung elektrischer Spannung oder die Erzeugung von EMK K bei dem Umsatz nichtelektrischer Energieformen in elektrische kommen in diesem Abschnitt qualitativ neue Umwandlungsformen nicht mehr in Frage. Um so bedeutender sind aber auf den meisten Gebieten die Fortschritte in quantitativer Richtung als Grundlage der technischen Entwickelung.

Auf dem durch sein Alter ehrwürdigen Gebiet der Reibungselektrizität bedeutet die Erfindung der Influenzmaschine oder Elektrophormaschine im Jahre 1865 einen relativ grossen Fortschritt in der Leistungsfähigkeit gegenüber den gewöhnlichen Elektrisiermaschinen. In demselben Jahre (1865) wurde die Influenzmaschine in zwei verschiedenen Ausführungen angegeben, nämlich mit leitenden rotierenden Sektoren von Toepler und mit rotierenden Nichtleitern von Holtz (näheres vgl. **138**).

Auf dem Gebiete der galvanischen Elektrizität nahm, so weit chemisch-elektrische Energiewandlungsprozesse in Frage kommen, die Entwickelung der letzten Periode eine etwas unerwartete Richtung. Während nämlich alle Versuche die grossen Energiemengen in den oxydierbaren Stoffen, namentlich Kohle, direkt mit Hülfe von Primärelementen in elektrische Energieform überzuführen vom technischen Standpunkt aus fehlschlugen, erreichte die Ausbildung der sogenannten Sekundärelemente oder Akkumulatoren eine überraschend grosse technische Bedeutung. Immer und immer wieder waren es gerade die aus den Energiegleichungen gefolgerten Möglichkeiten die technisch gebrauchten grossen elektrischen Energiemengen auf dem scheinbar billigsten und nächstliegenden Wege direkt in Primärelementen mit Hülfe des vorhandenen chemisch-elektrischen Energiegefälles zu gewinnen, welche die meisten Energetiker hoffnungsvoll auf die Primärelemente blicken liess und zum Teil noch blicken lässt. Nichtsdestoweniger waren die Fortschritte auf dem Gebiete der Primärelemente in dieser Periode vielleicht geringer als auf allen anderen Gebieten.

Qualitativ neue Gesichtspunkte sind kaum zu verzeichnen, höchstens die vom technischen Standpunkte aus wichtigere Ausbildung der sogenannten Trockenelemente — Anfang der achtziger Jahre — gegenüber den umständlichen und schwer transportablen nassen Elementen. Allerdings ist nicht zu verkennen, dass sowohl die Elemente mit einer als mit zwei Flüssigkeiten verschiedentlich Verbesserungen erfuhren, welche aber doch als von keiner technisch nachhaltigen Bedeutung betrachtet werden können. Eine gewisse Beachtung verdient vielleicht der Umstand, dass die beträchtlichen Fortschritte der vorausgegangenen Periode auf dem Gebiete der Elemente mit zwei Flüssigkeiten eigentlich keine wesentliche Fortsetzung erfuhren, während die Verbesserung der Elemente mit einer Flüssigkeit einige Beachtung verdient. Erwähnenswert ist hier, bei den Elementen mit einer Flüssigkeit, zunächst die Ausbildung des Zinkkohle-Elementes mit Braunsteinpulver (Mangansuperoxyd) als Depolarisator durch Leclanché im Jahre 1867. Über zahlreiche Varianten (näheres siehe Bd. III, 1) gelangte man auf derselben Basis

zu den sogenannten Trockenelementen, deren Erregerflüssigkeit (Salmiak) in porösem oder gelatinösem indifferenten Zwischenmittel aufgesaugt enthalten ist, eine Form, die zuerst in Frankreich von DESRUELLES und SCRIVANOW (1880) hergestellt worden sein soll.

Mit anderer Erregerflüssigkeit, nämlich chromsauren Lösungen, haben die Elemente mit einer Erregerflüssigkeit eine solche Steigerung der Leistungsfähigkeit erfahren, dass sie Mitte der achtziger Jahre eine geschichtlich interessante Verwendung zur Erzeugung grösserer elektrischer Energiemengen gefunden haben. Die Versuche von RENARD und KREBS mit dem lenkbaren Luftballon in Paris (1885) erforderten eine möglichst leichte Antriebsmotor-Einrichtung von etwa 9 PS Leistung. Eingehende Untersuchungen ergaben, dass ein GRAMMEscher Elektromotor, getrieben durch eine Batterie von Zink-Silberelementen mit gesättigter Chlorochromsäurelösung, das relativ geringste Gewicht besass. Von diesen eigens hierzu konstruierten Zink-Silberelementen mit grosser wirksamer Oberfläche — daher auch die Wahl von dünnem Silberblech, welches den Zinkstab cylindrisch umgab, an Stelle von Kohle — wurden 480 Stück mit einem Gesamtgewicht von etwa 400 kg so geschaltet, dass je 6 immer parallel, also 80 solche Gruppen in serie wirkten. Da die Maximalleistung jedes Elementes mit etwa 1,93 Volt EMK aus der Charakteristik (vgl. Revue de l'Aéronautique 1890, Diagramm 9) sich bei etwa 0,8 Volt Klemmenspannung und 18,5 Ampère Stromlieferung, d. h. zu 14,8 Watt ergiebt, so resultiert die technisch immerhin beachtenswerte elektrische Leistung von 7130 Watt aus der ganzen Primärbatterie. Da diese Leistung etwa 1 Stunde 36 Minuten geliefert werden konnte, bis die Zinkstäbe aufgezehrt waren, so war bei dieser interessanten Verwendung von Primärelementen eine Energiemenge von 11,4 Kilowattstunden verfügbar, zusammgesetzt aus 64 Volt $\times$ 111 Ampère $\times$ 1,6 Stunden.

Obwohl man hier von einer technischen Verwendbarkeit der chemisch-elektrischen Energiewandlung bei Primärelementen in grösserem Massstabe sprechen kann, so wird doch der relativ sehr hohe Preis der Kilowattstunde, sowie die relativ beschränkte Energiekapazität eben nur in ganz besonders gelagerten Fällen eine solche Verwendung ermöglichen, während für gewöhnlich von einer wirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit der direkten chemisch-elektrischen Energiewandlung mit der indirekten auf dem Umwege des Dampfkessels, der Dampfmaschine und der Dynamos vorläufig noch keine Rede sein kann. Ja gerade die in den letzten Jahren der Periode (1894 u. ff.) gemachten vergeblichen Versuche der direkten chemisch-elektrischen Verbrennung der Kohle in den sogenannten Kohlenoxydelementen (vgl. Bd. III, 1, § 16), also die vergeblichen Bemühungen der Energiewandlung bei Oxydation der Kohle den Weg über die elektrische Energieform zu weisen, lassen die Aussicht auf die von OSTWALD mit ziemlicher Zuversicht vorausgesagte Umwälzung auf dem Gebiete der Elektrotechnik infolge Verdrängung der elektrischen Maschinenenergie durch chemisch-elektrische Energiequellen in Form grosser Primärelemente als recht zweifelhaft, zum mindesten aber in weiterer Zukunft liegend erscheinen.

Die unangenehme Eigenschaft der Polarisation von arbeitenden Elementen mit einer Flüssigkeit, die aus der Bedeckung der (aussen positiven) Ableitungselektrode mit einer (Wasserstoff-)Gasschicht entspringt und welche LECLANCHÉ durch Anwendung des Mangansuperoxydes abzuwenden suchte, veranlasste auch die Benutzung anderer Oxyde. Hiervon hat die Verwendung des

Kupferoxydes zur Depolarisation, wie sie 1881 von LALANDE im Zink-Natronlauge-Kupfer-Element zuerst angegeben wurde und verschiedentlich, unter andern im Cupronelement (vgl. Bd. III, 1, § 8), weitere Ausbildung erfahren hat, vorläufig keine bemerkenswerte technische Bedeutung erlangen können.

Um so bedeutungsvoller gestaltete sich die Ausbildung des Elementes: Metallisches Blei — wässerige Schwefelsäure — Bleisuperoxyd; zwar nicht als Primärelement, wohl aber als chemisch-elektrisches Zwischenglied der Dynamo-Elektrotechnik in Gestalt der (elektrischen) Akkumulatoren (weiteres siehe Bd. III, 2). Diese vorübergehende Aufspeicherung der elektrischen Energieform durch Überführung in chemische Energieform beim Vorgang der Ladung, sowie die durch Polarisation in ihrer Intensität kaum nennenswert begrenzte Rückwandlung jener Energie genau nach Art eines grossen Primärelementes bei der Entladung besitzt vorläufig die wirtschaftlich weitaus grösste Bedeutung der chemisch-elektrischen Beziehungen und bietet eine ungeahnte Entwickelung der zuerst (1803) von RITTER an seiner „Ladungssäule" gemachten Beobachtung dieses Aufspeicherungsverfahrens (vgl. **10**), das aber kaum beachtet wurde. Über die namentlich quantitative Entwickelung dieser qualitativ nur wenig bereicherten Grunderfahrung in ihrer speziellen Anwendung auf die Bleiakkumulatoren (1854 SINSTEDEN) seit ihrer zuerst von PLANTÉ (1859) erkannten wirtschaftlichen Bedeutung, sowie der jetzt überwiegend benutzten künstlichen Vermehrung der aktiven Masse nach FAURE (1881) siehe Bd. III, 2.

Die thermisch-elektrischen Umwandlungsapparate brachten in dieser Periode eine ähnliche Enttäuschung hinsichtlich ihrer quantitativen, d. h. technisch-wirtschaftlichen Weiterentwickelung wie die Primärelemente. Gegenüber der letzten Periode erfüllten sich die Hoffnungen auf Grund energetischer Betrachtungen bisher in kaum wesentlich gesteigertem Masse. Zwar hatten die Bemühungen den Wirkungsgrad der thermisch-elektrischen Energiewandlung zu erhöhen, einigen Erfolg, wenn man die gegenwärtig am günstigsten arbeitende Thermosäule von GÜLCHER (1890—1894) mit der älteren von NOË (1876) oder der noch älteren von MARCUS (1860) vergleicht, aber trotzdem lassen weder die Leistung der beiden Thermosäulen mit etwa 30 Watt bei 60 Elementen, noch weniger der totale thermisch-elektrische Wirkungsgrad der Energiewandlung von wenig über 0,5 % eine näher bevorstehende Umwälzung der Elektrotechnik durch thermo-elektrische Stromquellen erwarten, wie wohl einige enthusiastische Thermoelektriker träumen.

Der Grund für die geringe Weiterentwickelung auf diesem Gebiete, wenigstens nach der energetischen Seite zu, wenn man von der Ausbildung für messtechnische Zwecke hier absieht (vgl. Bd. III, 1), ist vielleicht darin zu suchen, dass ein tieferer Einblick in den Zusammenhang der thermoelektrischen Erfahrungsthatsachen uns bis zum Schluss der Periode scheinbar noch abging. Wenn auch die weitere Erforschung sowohl der SEEBECKschen Beobachtung (vgl. **18**), sowie der PELTIERschen Umkehrerscheinung in dieser Periode noch einige Resultate zeitigte, wie z. B. den Nachweis von ICILIUS (1857) und FRANKENHEIM (1858), dass die Temperaturänderung der Lötstelle der durchgehenden Stromstärke proportional ist, ferner die Benutzung der von GAUGAIN (1862) und von AVENARIUS (1863) gemachten Beobachtungen zur Konstruktion der thermo-elektrischen Diagramme (vgl. **93**), so haben doch die zahlreichen Theorien und Phantasien über die thermischelektrischen Erfahrungsthatsachen bis jetzt noch keine entscheidende Lösung

des ganzen Problems herbeiführen können. Einen tiefer greifenden Ansatzpunkt scheint der aus W. Thomsons Versuchsergebnissen (1854) — durch le Roux (1867) bestätigt — gezogene Schluss über eine „Fortführung der Wärme“ durch den elektrischen Strom zu bieten. Diese häufig als „Thomsoneffekt“ bezeichnete Erscheinung (vgl. **96**) scheint aber erst durch die am Schluss der Periode (vgl. ETZ 1900, 619, sowie **96**) gemachten Beobachtungen von Egg-Sieberg über die Rolle des Temperaturgefälles eine gewisse und zur Klärung notwendige Ergänzung finden zu sollen. Ja vielleicht besteht Aussicht, dass in weiterer Verfolgung derselben die Erforschung der thermo-elektrischen Erscheinungen hierdurch in ein ganz neues Fahrwasser gerät und in der kommenden Periode wesentliche Aufschlüsse dieses verhältnismässig noch wenig geklärten Gebietes bringt.

34. Entwickelung von Faradays Induktionsprinzip.

Einen gewissen Gegensatz zu den drei vorerwähnten Gebieten der Energiewandlung bietet in dieser Periode die Entwickelung des vierten und letzten Gebietes, nämlich die mechanisch-magnetelektrische Energiewandlung. Die Überführung der mechanischen Energieform in die elektrische mit Hülfe der dynamo-elektrischen Maschinen, oder kurzweg der Dynamos, mit ihrer nahezu beispiellos raschen Entfaltung auf technischem Gebiet in den zwei letzten Decennien ist so bekannt und ausserdem Gegenstand der geschichtlichen Abschnitte in Bd. III u. IV dieses Werkes, dass hier einige kurze Hinweise genügen.

Bemerkenswert bleibt, dass die Konstruktion von Maschinen auf dem Prinzip der magnet-elektrischen Induktion der grundlegenden Entdeckung Faradays (vgl. **19**) zwar rasch nachfolgte, dass jene aber längere Zeit ein ziemlich kümmerliches Dasein, überwiegend in physikalischen Kabineten, führten. Der Grund ist offenbar in der grossen Beschränkung zu suchen, welche die Verwendung von permanenten Magneten zur Felderzeugung in quantitativer Hinsicht bedingte. Die erste wichtigere Verbesserung der Ankerdrahtführung fällt mit dem Beginn dieser Periode zusammen. Es ist dies die Angabe des „Induktionscylinders“ von W. Siemens, welcher noch heute in der Schwachstromtechnik in den Läuteinduktoren mit permanenten Magneten eine Rolle spielt. Im gewissen Sinne eine Umkehrung stellt die Erzeugung von Wechselspannung dar, wie sie namentlich bei physikalischen Untersuchungen mit Wechselströmen benutzt worden ist, nämlich durch Rotation eines permanenten Magneten in einer Multiplikatorrolle, eine Vorrichtung, die zuerst (1864) durch W. Weber benutzt, später durch F. Kohlrausch (1874) zu einem Apparat umkonstruiert wurde, der unter dem Namen „Sinusinduktor“ bekannt ist. Die an sich geistreiche Idee von Wilde (1867), eine Art Multiplikation des Magnetismus herbeizuführen durch Benutzung des Stromes aus einer kleineren Maschine mit permanenten Magneten zur Erregung einer grösseren Maschine mit Schenkeln aus Weicheisen, verschaffte diesen Maschinen mit elektromagnetischer Felderzeugung zwar Eingang in die Technik, wurde aber schnell überflüssig. Im gleichen Jahre (1867) hatte nämlich W. Siemens in einer kurzen und unscheinbaren Mitteilung an die Berliner Akademie der Wissenschaften (vgl. Wiss. Arb. I, 208: „Über die Umwandlung von Arbeitskraft in elektrischen Strom ohne permanente Magnete.“) das Prinzip der Selbsterregung von Maschinen mit eisernen Schenkeln auf Grund des remanenten oder Restmagnetismus entwickelt. Dieses technisch schwerwiegende Dynamoprinzip kann als Wendepunkt in der Kurve des technischen Aufschwunges angesehen werden und erwies sich bis zum Schluss der Periode von einer überraschenden inneren Entwickelungskraft.

Die Aufgabe die Ankerwicklung so zu gestalten, dass bei Maschinen grösserer Leistung die Gegeninduktion in einzelnen Teilen einer fortlaufenden Wicklung auf ein Mindestmass beschränkt und der Wirkungsgrad der Umsetzung gesteigert wird, wurde in zwei aufeinanderfolgenden Jahren in den beiden auch heute noch typischen Grundformen gelöst. In der von GRAMME (1871) angegebenen Ringwicklung schützt das dem ringförmig gestalteten Ankereisen eigene Vermögen die Kraftlinien zu dirigieren und von dem kürzesten Wege zwischen den Polen abzulenken den innerhalb gelegenen Rückweg jeder Windung vor der Gegeninduktion. Letztere fällt in der von HEFNER-ALTENECK (1872) angegebenen Trommelwicklung fort wegen Vermeidung eines eigentlichen Rückweges durch Diagonalverbindungen auf den Endflächen des cylindrischen Eisenankers. Die sich hieran anschliessende Entfaltung zunächst der Gleichstromerzeuger führt ins rein Technische hinüber und damit aus dem Gebiet der Elektrophysik heraus.

Ermöglicht wurde diese Entfaltung aber auch erst durch Benutzung der allmählich auf physikalischem Boden vorbereiteten, wenn auch in ihrer grossen Bedeutung nicht erkannten Fortschritte unseres Wissens über den magnetischen Kreislauf. Anknüpfend an FARADAY gelangte zunächst ROWLAND (1873) im Gegensatz zu der immer noch herrschenden Theorie der magnetischen Pole und Schalen zur Erkenntnis der Analogiebeziehungen zwischen elektrischem und magnetischem Ausgleichgesetz. Dieser zuerst wenig beachtete Hinweis wurde alsdann 1882 und 1883 durch BOSANQUET wieder aufgegriffen und durch Einführung der den elektrischen Grössen analogen Begriffe „magnetomotorische Kraft“ und „magnetischer Widerstand“ den Fachkreisen etwas näher gebracht. Wiewohl bereits 1879 Lord ELPHINSTONE und VINCENT die Benutzung des magnetischen Ausgleichgesetzes für die Konstruktion von Dynamos empfohlen haben sollen (vgl. S. THOMPSON, Elektromagnet Seite XII), so wurde doch erst in den Jahren 1885 und 1886 der Bau der Dynamos durch die sogenannte englische Schule, vor allem die Gebrüder HOPKINSON und GISBERT KAPP, auf diese neue, richtige Basis gestellt und durch Untersuchungen über magnetische Streuung von FORBES, AYRTON und PERRY u. a. gefördert.

Die raschen Fortschritte auf dem Gebiete der Gleichstromerzeuger hatten vorübergehend eine nahezu völlige Verdrängung des Wechselstromes in der Technik zur Folge. Die in jeder Ankerwicklung in erster Linie erzeugte Wechselspannung und der daraus ohne Benutzung des Kommutators sich ergebende Wechselstrom erschien eben als das Unvollkommene und das Wechseln der Richtung für viele Zwecke unerwünscht, für die übrigen lästig oder zum mindesten unnötig, soweit nicht der Wechselstrom erfordernde Betrieb von Jablochkoffkerzen in Frage kam. Die Konstruktion der vollkommeneren Gleichstrombogenlampen liess somit für nahezu zwei Jahrzehnte den Wechselstrom als überwundenen Standpunkt betrachten, bis seine eigentümlichen Vorzüge, zunächst die Transformierbarkeit (Mitte der achtziger Jahre) und einige Jahre später die Phasenverkettung erkannt und in ihrer technischen Bedeutung voll gewürdigt wurden. Erst dann erhielt dieser wegen seiner Schwierigkeit der Behandlung sowohl praktisch als theoretisch vorübergehend etwas stiefmütterlich behandelte Sohn die ihm gebührende Stellung, wenigstens von Seiten der Technik, während die Physiker vielfach bis zum Schluss der Periode mit einer gewissen abneigungsvollen Scheu diesen etwas unheimlichen Verwandten betrachteten, der in seiner rätsel-

haften Eigentümlichkeit mit den Erscheinungen der Selbstinduktion, der Kapazitätsstromstärken, der Resonanzspannungen und dergleichen gegen die Herrschaft des OHMschen Gesetzes rebellierte. Es darf aber deshalb nicht übersehen werden, dass sein Anfang aufs Engste mit der Elektrophysik zusammenhängt, wenn auch das Gebiet der späteren speziellen Wechselstromphysik vielfach von Elektrotechnikern bebaut wurde. Besonders deutlich tritt dieser Zusammenhang hervor, wenn man die Anfänge der Mehrphasenstrom-Technik betrachtet; ebenso den innerlich engen Zusammenhang der Erscheinungen der Wechselstromtechnik mit den sogenannten Teslaerscheinungen und weiterhin mit den ins Optische hinüberführenden HERTZschen Schwingungen. Das sich stetig steigernde Hervortreten der beim Gleichstrom völlig untergeordneten Leitereigenschaften der Selbstinduktion und Kapazität führt hier schliesslich zu anscheinend völlig anderen Erscheinungen, deren enge qualitative Verwandtschaft sich aber unserer heutigen Erkenntnis nicht mehr zu verbergen vermag. (Weiteres vgl. H. I, 2).

Der in der heutigen Technik so wichtige Apparat zur Transformierung der Wechselstromenergie entwickelte sich aus dem schon längere Zeit in der Physik benutzten und aus der letzten Periode übernommenen Induktionsapparat (vgl. **26**). Die Umwandlung, welche letzterer in dieser Periode durch RUHMKORFF (1851) in den nach ihm benannten Funkeninduktor erfuhr, sowie seine Verbesserung durch Hinzufügung des Kondensators (FIZEAU 1853), machten denselben aber zunächst nur zu einem wertvollen Hülfsmittel für physikalische Untersuchungen, namentlich auf dem Gebiet der Gasentladungen. Seine empirisch gefundene Eigenschaft auf sehr bequeme Weise kleine Mengen hochgespannter Wechselstromenergie aus der Gleichstromenergie von Primärelementen zu erzeugen bezw. zu transformieren, begründete seine nahezu alleinige Herrschaft als Erzeuger von Wechselspannung für physikalische Wechselstromforschungen. So bedeutungsvoll er auch in dieser Beziehung geworden ist, so bedingte doch die Kompliziertheit der bei diesem Apparat vorliegenden elektrischen Ausgleichverhältnisse den ausschliesslich qualitativen Charakter der Untersuchungen und die Verzögerung einer Aufklärung aller derjenigen Erscheinungsseiten, welche nur auf Grund genauer Messungen, namentlich auf energetischem Gebiet erfolgen kann. Erst nach Ausbildung der Wechselstrommesstechnik an dem weitaus einfacheren und leichter übersehbaren symmetrischem Maschinenwechselstrom war eine Klärung der Wellenstromerscheinungen des Induktionsapparates nach der messtechnischen Seite möglich.

Die Entwickelung der Wechselstrommesstechnik hing aber aufs Engste mit der Entwickelung der Wechselstromtechnik zusammen, welche ihrerseits wieder auf der Entwickelung des Wechselstromtransformators und seiner Verwendbarkeit beruhte. Auch hier führte ein fruchtbringender geistiger Kreislauf von der Elektrophysik ausgehend über die Elektrotechnik wieder zur Elektrophysik zurück. Die erste technische Umbildung des Induktionsprinzips bei stationären Apparaten mit zwei elektrisch voneinander getrennten Wicklungen benutzte aber den charakteristischen Vorteil der Spannungsübersetzung merkwürdigerweise noch nicht, oder doch in sehr untergeordnetem und nebensächlichem Masse, vielmehr war es bei diesen ersten von GAULLARD und GIBBS (1883) in Serienschaltung benutzten Transformatoren zunächst nur die Möglichkeit der Teilung der elektrischen Wechselstromleistung der Maschine und ihre Verteilung an verschiedene Konsumstellen, worauf der

Nachdruck gelegt wurde. Das damals im Vordergrund des Interesses stehende Problem der Energieteilung war es wohl auch in erster Linie, welches zu dem technisch entscheidenden Entwickelungsschritt des stationären Transformators führte, das ist die im Jahre 1885 von Zipernowsky, Dery und Blathy angegebene Parallelschaltung der Primärwicklungen in Verbindung mit dem magnetischen Schluss des Eisenkernes. Der gleichzeitige Vorteil der ausserordentlich bequemen Spannungsumsetzung erwies seine grosse Bedeutung in der weiteren Entwickelung der Wechselstromtechnik. (Weiteres vgl. Bd. V.)

Der zweite entscheidende Schritt auf dem Wechelstromgebiete, die Ende der achtziger Jahre aufgefundene Phasenverkettung mehrerer Wechselströme zur Erzeugung eines Drehfeldes und die damit in Zusammenhang stehende Entwickelung der Mehrphasen-Generatoren mit der Verkettung von Wechselspannungen, wurzelt auch in der Elektrophysik. Zum Beweis braucht hier nur auf den wissenschaftlichen Begründer der Phasenverkettung, Ferraris (1888), hingewiesen zu werden. Gerade hier kennen wir die Ideenverknüpfung allem Anscheine nach ziemlich gut; dieselbe sei nach einem für dieses Gebiet auch geschichtlich interessanten Vortrag von A. du Bois-Reymond (vgl. ETZ 1891, 303) hier angeführt, schon mit Rücksicht auf das Interesse, welches der Zusammenhang mit dem optischen Gebiet beansprucht:

Selbst wenn uns nicht durch Maxwell und neuerdings durch Herrn Hertz die Identität der optischen und elektromagnetischen Vorgänge zum Glaubensartikel gemacht worden wäre, müsste die rein äusserliche Ähnlichkeit der elliptischen und kreisförmigen Polarisation, mit den unsere Aufmerksamkeit so sehr fesselnden Drehstromerscheinungen auffallen.

Diese Analogie wird wohl auch dem Entdecker des Drehstromes, Herrn Ferraris, vorgeschwebt haben, als er seine grundlegenden Versuche ausführte. Er ersetzte einfach die beiden superponierten Bewegungen des Ätheratoms durch die Veränderungen zweier superponierter Felder und erhielt ein resultierendes magnetisches Feld, dessen Richtung und Stärke durch die Richtung und Länge des Radius vector der entsprechenden optischen Schwingungsfigur dargestellt wird.

Für die Verwendung eines solchen rotierenden magnetischen Feldes zum Betriebe von Elektromotoren ist es wichtig, dass die Winkelgeschwindigkeit und die Stärke des

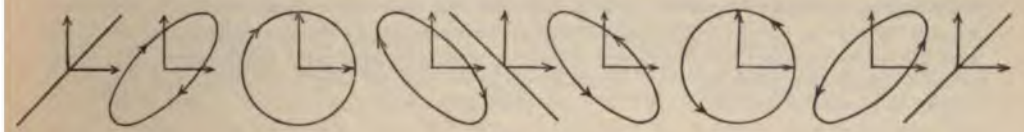


Fig. 4.

Feldes konstant sei, oder um den optischen Ausdruck zu gebrauchen, dass vollkommen kreisförmige Polarisation erreicht werde. Daher interessieren uns in erster Linie die Bedingungen, welchen genügt werden muss, um diese Aufgabe zu erfüllen. Wir sehen zunächst aus unserer Figur (vgl. Fig. 4 zur Veranschaulichung der Entstehung des elliptisch und kreisförmig polarisierten Lichtes bei einer Phasenverschiebung der Schwingungsantriebe von $^0/_8$, $^1/_8$ bis $^8/_8$ der Periode), dass die Schwingungsfigur nur dann zum Kreise wird, wenn die Amplituden der beiden komponierenden Schwingungen gleich sind und wenn die Phasenverschiebung zwischen beiden Schwingungen 90^0 beträgt. Hier aber verlässt uns die Analogie der optischen Polarisation, denn die optischen Schwingungen interferieren immer nur so, dass die Richtungen der Komponenten einen Winkel von 90^0 einschliessen. Dabei ist auch Herr Ferraris stehen geblieben, vielleicht weil er die Polarisationslehre vor Augen hatte. Er beginnt nämlich seine berühmte Abhandlung (Galileo Ferraris, Rotationi elettrodinamiche prodotte per mezzo die correnti alternate.

6*

Torino 1888) mit den Worten: „Sia O un punto di uno spazio nel quale si sovrappongono i campi magnetici prodotti da due correnti elettriche: le direzioni OX ed OY che hanno i due campi magnetici nel punto O sieno diverse, per esempio perpendicolari l'una all altra" und bleibt im folgenden dieser Voraussetzung treu.

Der weitere Ausbau auf dieser elektrophysikalischen Grundlage durch Tesla, v. Dolivo-Dobrowolsky und andere führt ins rein Technische (siehe Bd. IV). Über die weiteren Untersuchungen des Drehfeldes siehe H. I, 2.

35. Dielektrische Erscheinungen und elektrische Schwingungen.

In der Erforschung der dielektrischen Vorgänge und Erscheinungen, scheint uns rückblickend der weitere Weg eigentlich durch die Untersuchungen von Faraday vorgezeichnet, aber es bedurfte fast des Verlaufs der ganzen Periode, ehe die Allgemeinheit zum vollen Verständnis der Ergebnisse Faradays gelangte, und erst ein so kräftiger Anstoss, wie ihn die experimentellen Untersuchungen von Hertz boten, wendete den Dielektricis das allgemeine Interesse der Elektrophysik zu. Obwohl man auf Grund dieser Untersuchungen über die grosse Rolle, welche die Isolierstoffe bei allen elektrischen Vorgängen, namentlich aber bei den elektrischen Schwingungen spielen, wohl allgemein ins Klare gelangt ist, so bieten doch wenige Gebiete der Elektrophysik am Schluss der Periode noch so viel unerforschtes und abbaufähiges Terrain als gerade das Gebiet der dielektrischen Erscheinungen. Es sei in dieser Beziehung nur auf den Stand der Frage des elektrischen Rückstandes, der dielektrischen Hysterese u. s. f. hingewiesen. Die praktisch wichtigen Konsequenzen der Kapazitätserscheinungen isolierter Leitungen hatte am Schluss der vorigen Periode (1849) Werner von Siemens, der Erfinder der Guttaperchakabel, zu ziehen Gelegenheit, der zuerst die eigenartigen Verzögerungs- bezw. Verwischungserscheinungen der telegraphischen Zeichen auf Ladeerscheinungen im Sinne Faradays zurückführte. Charakteristisch für die damalige Zeitströmung ist folgende Stelle aus seinen „Lebenserinnerungen" (vgl. Seite 74):

Meine Theorie der elektrostatischen Ladung geschlossener wie offener Leitungen fand übrigens selbst in naturwissenschaftlichen Kreisen anfänglich keinen rechten Glauben, da sie gegen die in jener Zeit herrschenden Vorstellungen verstiess. Überhaupt ist es heute, wo man kaum noch begreift, wie ein zivilisierter Mensch ohne Eisenbahnen und Telegraphen leben kann, nicht leicht, sich auf den damaligen Standpunkt zu versetzen, um zu verstehen, welche Schwierigkeiten sich uns damals in Dingen entgegenstellten, die jetzt als selbstverständlich betrachtet werden. Vorstellungen und Hülfsmittel, die heute jedem Schuljungen geläufig sind, mussten in jener Zeit oft erst mit Mühe und Arbeit errungen werden.

Nachdem dieses Gebiet von Helmholtz, namentlich aber von Maxwell (Phil. Tr. 1865, 459), in Faradays Sinne der „dielektrischen Polarisation" bezw. Verschiebung auch theoretisch ausgebaut war, wendeten auch die Experimentatoren demselben mehr Aufmerksamkeit zu. War es bisher Faraday, Siemens, Belli, Matteuci, Rossetti, Boltzmann u. a. nur gelungen die Dielektrizitätskonstanten von festen und flüssigen Körpern zu bestimmen, während die meisten von ihnen Unterschiede derselben zwischen Luft und anderen Gasen vergeblich gesucht hatten, so gelang diese Bestimmung zuerst Boltzmann (1873 P. A. 155, 407) und gewährte in ihren Ergebnissen eine starke Stütze der Maxwellschen Theorie. Besonders rege wurde die Forschung auf dem Gebiete der Dielektrizitätskonstanten alsdann wieder im letzten Decennium der Periode nach den Entdeckungen von Hertz. (Weiteres siehe im dritten Abschnitt, **119** u. ff.)

Die langbekannte elektrische Rückstandserscheinung erfuhr zwar auch wiederholte Inangriffnahme durch bedeutende experimentelle Forscher, wie R. Kohlrausch (1854), Gaugain (1864), Hopkinson (1872), Giese (1880), Rowland und Nichols (1881), Hertz (1883), Arons (1888), Muraoka (1890) und viele andere, sowie auch mehrfache theoretische Behandlung wie durch Boltzmann, Romich und Nowak (1874), Riemann (1876), Hopkinson (1877), Maxwell (1878); dennoch steht eine ausreichende Klarstellung der Grundlage dieser Erscheinungen noch aus. Noch ergänzungsbedürftiger erscheinen die hiermit im engen Zusammenhang stehenden Erscheinungen der dielektrischen Polarisationsarbeit oder auch Hysterese, welche zuerst und bereits frühzeitig (1864, vgl. Wiss. Arb. I, 182) von W. von Siemens aus der Erwärmung des Dielektrikums durch wiederholte Ladung und Entladung nachgewiesen wurde. (Näheres siehe **125** und **126** im dritten Abschnitt.)

Charakteristisch für die dielektrischen Erscheinungen ist der Umstand, dass eine grosse Zahl derselben nicht zufällig, sondern erst nach eifrigem Suchen an der Hand der Folgerungen aus der Faraday-Maxwellschen Auffassung des Dielektrikums gefunden wurde. Dies trifft auch zu für die beiden noch folgenden Erscheinungen der Doppelbrechung und der Elektrostriktion in dielektrischen Substanzen innerhalb eines elektrischen Feldes.

Die Erscheinung der Doppelbrechung in einem inhomogenen elektrischen Feld, d. h. bei wechselnder Dichte der elektrischen Kraftlinien, wurde hauptsächlich nach ihrer Auffindung durch Kerr (1875) durch denselben Forscher in den folgenden zehn Jahren qualitativ für viele Stoffe festgelegt und durch Quincke (1883) durch anschliessende quantitative Messungen bestätigt.

Neben diesem indirekten optischen Nachweis der nach Maxwell berechenbaren „Elektrostriktion", d. i. der Pressung im Dielektrikum abhängig von der Stärke des elektrischen Feldes (gemessen in elektrischen Kraftlinien), gelang alsdann wenig später der direkte Nachweis in Gestalt genauerer Messungen der hierdurch bewirkten Volumenänderungen durch Duter und durch Quincke in den Jahren 1878 bis 1883 (siehe **132** im dritten Abschnitt.)

Die Entwickelung in der Erkenntnis dielektrischer Vorgänge und ihrer wesentlichen Bedeutung für die elektrischen Ausgleichvorgänge weist bereits auf die Verlegung des Schwerpunktes nach der von Faraday angebahnten Richtung hin. Wird die vorausgegangene Periode hauptsächlich charakterisiert durch den Ausbau der Gleichstromseite, d. h. die Aufdeckung der Vorgänge innerhalb der Strombahn, so kann die letzte Periode als die Periode der elektrischen Schwingungen oder des Wechselstromes im weitesten Sinne bezeichnet werden. Die völlige und unzweifelhafte experimentelle Aufdeckung der elektrischen Dreiseitigkeit oder auch Dreifaltigkeit, das ist des unlösbaren Zusammenhanges der elektrischen Leitervorgänge mit den Vorgängen im magnetischen und im elektrischen Feld, eröffnet mit dem Weg in das weite Erscheinungsgebiet der elektrischen Schwingungen gleichzeitig den Übergang in eins der wichtigsten Grenzgebiete, nämlich in die Elektrooptik.

Es kann als ein naturnotwendiges Expansionsbestreben der lebensvollen Elektrizitätswissenschaft angesehen werden, dass nach Kultivierung der innersten, rein-elektrischen Erscheinungsgebiete die elektrischen Grenzgebiete in Angriff genommen wurden. Den Übergang hierzu bildet das Verlassen

des bisherigen einseitigen Gleichstromstandpunktes mit seiner Betonung des einen Leitungskoeffizienten, des OHMschen Widerstandes R, der elektrischen Ausgleichbahnen. Die nachdrückliche Berücksichtigung und das Studium der beiden anderen Hauptleitungskoeffizienten, des elektromagnetischen Trägheitsmomentes (Selbstinduktionskoeffizient L) der Strombahn, sowie ihrer elektrischen Elastizitätseigenschaften (Kapazität C) sprengen gleichsam die Gleichstromfesseln. Von dem Gleichstromstandpunkt mit relativ beschränktem Umblick wird so die Elektrophysik auf den höheren und allgemeineren Wechselstromstandpunkt geleitet. Der hier vorhandene, viel freiere Umblick gewährt neben einem tiefen Einblick in die verschiedenen Gebiete der Elektrizitätswissenschaft auch den Ausblick auf den Übergang in das Nachbarreich der Optik. Von MAXWELL auf theoretischem Wege angebahnt blieb dieser Fortschritt aber zunächst vereinzelt und wurde für die Allgemeinheit der Elektrophysik erst durch die Auffindung und den sicheren Nachweis der Erfahrungsthatsachen zum festen Besitz.

Die experimentelle Erweiterung unserer Kenntnis über die Ausgleichform der elektrischen Schwingungen beginnt mit FEDDERSEN (1861), welcher den oscillatorischen Charakter der Entladungen von Kapazitäten bei gewissen Widerstandsverhältnissen im Entladungskreis mit Hülfe eines rasch rotierenden Spiegels nachwies. OETTINGEN gelang es 1862 auch das Eintreten des Polaritätswechsels an den Belegungen für diese Fälle nachzuweisen. Nach der quantitativen Seite wurden diese experimentellen Arbeiten im Hinblick auf die Theorie der elektrischen Schwingungen (vgl. H. I, 2) weiter ausgebildet, namentlich von SCHILLER (1872), KLEMENCIC und HIECKE (1887). Alle diese Untersuchungen beziehen sich aber nur auf sogenannte stehende Schwingungen und zwar meist Schwingungen von der Grössenordnung von etwa 10^{-6} Sekunden. Der für die Elektrizitätslehre so folgenschwere Nachweis von fortschreitenden Wellen und die Untersuchung ihrer Eigenschaften gelang nach längerem Suchen HEINRICH HERTZ im Verlauf der Jahre 1887—1891 (vgl. H. I, 2 sowie H. HERTZ, G. W., Bd. II, Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft). Nachdem ihm zunächst eine Steigerung der Schwingungszahl auf die Grössenordnung 10^8 in der Sekunde, oder auch eine Verkürzung der Schwingungsdauer auf 10^{-8} Sekunden gelungen war (1887, W. A. 31, 421 „Über sehr schnelle elektrische Schwingungen“) wurden von ihm Schritt für Schritt die wesentlichen Seiten der Erscheinungen aufgedeckt, so namentlich auch der Übergang in die Optik durch den Aufsatz: Über Strahlen elektrischer Kraft (1888, S. d. Berl. Akad. d. Wiss. vom 13. Dezember) mit dem Nachweis der optischen Eigenschaften wie der gradlinigen Ausbreitung, der Polarisation, der Reflexion und der Brechung; endlich der experimentelle Nachweis der elektromagnetischen Eigenschaften, das ist des elektrischen und magnetischen Feldes in dem Aufsatz: Über die mechanischen Wirkungen elektrischer Drahtwellen (1891, W. A. 42, 407).

Die Zusammenfassung des Resultates dieser wichtigsten Experimentaluntersuchungen der ganzen Periode möge mit den eigenen Worten von H. HERTZ erfolgen (vgl. G. W., Bd. II, Einleitung, Seite 20):

Durch die Gesamtheit der geschilderten Versuche ist zum ersten Male der Beweis geliefert worden für die zeitliche Ausbreitung einer vermeintlichen Fernkraft. Diese Thatsache bildet den philosophischen, in gewissem Sinne zugleich den wichtigsten Gewinn der Versuche. In jenem Beweise ist enthalten die Erkenntnis, dass die elektrischen Kräfte sich von den ponderabeln Körpern loslösen und selbständig als Zustände oder Verände-

rungen des Raumes fortbestehen können. Neben dieser Erkenntnis liefern die Einzelheiten der Versuche den Beweis, dass die besondere Art der Ausbreitung der elektrischen Kraft die grösste Analogie[1]), wenn nicht vollständige Übereinstimmung zeigt mit der Ausbreitung der Lichtbewegung. Dadurch wird die Hypothese, dass das Licht eine elektrische Erscheinung sei, in hohem Grade wahrscheinlich gemacht. Ein strenger Beweis für diese Hypothese kann von vornherein nur durch Versuche geliefert werden, welche am Lichte ausgeführt sind.

Was wir hier als die Leistung der Versuche bezeichnet haben, leisten dieselben unabhängig von der Richtigkeit besonderer Theorien. Nichtsdestoweniger liegt die Bedeutung der Versuche offenbar in ihrem Zusammenhange mit der Theorie, in welchem Zusammenhange sie ja auch unternommen wurden. Seit dem Jahre 1861 besitzt die Wissenschaft die Theorie, welche MAXWELL auf den Anschauungen FARADAYS aufgebaut hat, welche wir deshalb die FARADAY-MAXWELLsche Theorie nennen und welche die Möglichkeit der hier aufgefundenen Klasse von Erscheinungen mit der gleichen Sicherheit behaupten konnte, mit welcher die übrigen elektrischen Theorien gezwungen waren, die Möglichkeit derselben zu verneinen. Die MAXWELLsche Theorie übertraf von vornherein die übrigen elektrischen Theorien durch Schönheit und Reichtum der Beziehungen, welche sie zwischen den Erscheinungen annahm. Die Wahrscheinlichkeit dieser Theorie und damit die Zahl ihrer Anhänger wuchs von Jahr zu Jahr. Gleichwohl vermochte die MAXWELLsche Theorie die ihr entgegenstehenden Theorien nicht vollständig zu verdrängen, weil sie sich nur auf die Wahrscheinlichkeit ihrer Ergebnisse, nicht auf die Sicherheit ihrer Voraussetzungen berufen konnte. Die Fundamentalhypothesen der MAXWELLschen Theorie widersprachen den üblichen Anschauungen und konnten sich nicht an sichere Versuche als an Beweise anlehnen. In diesem ihrem natürlichen Zusammenhang können wir Absicht und Ergebnis unserer Versuche nicht besser charakterisieren, als indem wir sagen: Die Absicht dieser Versuche war die Prüfung der Fundamentalhypothesen der FARADAY-MAXWELLschen Theorie und das Ergebnis der Versuche ist die Bestätigung der Fundamentalhypothesen dieser Theorie.

Zu der obenerwähnten Überwindung des Gleichstromstandpunktes haben diese klassischen Untersuchungen von H. HERTZ kräftig beigetragen. Der Nachweis der endlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit zweier Polarisationszustände des den Leiter umgebenden Raumes, nämlich des elektrischen und des magnetischen Feldes bildete die wichtige Ergänzung zu dem Verlauf des Ausgleichvorganges im Stromkreise, hier Leiterkreis und Funkenstrecke. Die experimentelle Aufsuchung der Lagen der beiden Feldintensitäten gegenüber dem Leiter und gegen einander — bei stehenden Wellen im Leiter — gestattete die Ausmessung der elektromagnetischen Wellen und lieferte damit gleichsam die Dynamik der beiden Felderscheinungen, deren Statik schon hauptsächlich durch FARADAYS Untersuchungen ausgebildet war.

Mit diesem Sieg der elektromagnetischen Lichttheorie erwies sich der alte optische Streit, ob die Schwingungen zur Polarisationsebene senkrecht stehen (FRESNEL), oder in derselben liegen (F. NEUMANN) als gegenstandslos, da gemäss den MAXWELLschen Ableitungen stets zwei voneinander untrennbare und aufeinander senkrechtstehende Schwingungszustände vorliegen, der elektrische und der magnetische (vgl. hierzu H. I, 2). Für die Harmonie der ganzen Physik aber noch entscheidender und schwerwiegender war die nunmehrige Erkenntnis der Wesensgleichheit der Hauptstrahlungsarten und die Ausfüllung der noch bleibenden grossen Lücke in den unsichtbaren Strahlungen mit der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes durch die elektromagnetischen Wellen.

---

1) Die Analogie liegt keineswegs nur in der Übereinstimmung der mehr oder weniger genau gemessenen Geschwindigkeiten. Die nahezu gleiche Geschwindigkeit ist nur ein Element der Analogie unter vielen Elementen.

Die an HERTZ anknüpfenden Experimentaluntersuchungen anderer Forscher wie LECHER, ZEHNDER, ARONS, RUBENS, KLEMENCIC, BOLTZMANN, BLONDLOT, BJERKNES, SARASIN, DE LA RIVE u. a. haben daher neben den erwünschten Verbesserungen zum Nachweis der Knoten und Bäuche durch Steigerung der Empfindlichkeit der Resonanz zwecks besserer Ausmessung auch die Annäherung der elektrischen Wellen an die bisher bekannten Licht- und Wärmestrahlungen verfolgt. War HERTZ mit seinen Anordnungen durch Verkleinerung der Kapazitäten C und Selbstinduktion L seiner Strombahnen bis zu Werten der Schwingungsdauer $\tau = \pi \sqrt{L \cdot C}$ von der Grössenordnung 10^{-8} Sekunden gelangt, d. h. bei der Fortpflanzungsgeschwindigkeit $v = 3 \cdot 10^8$ m zu Wellenlängen von einzelnen Metern, so gelangten schliesslich RIGHI und LEBEDEW durch ihre kurzwelligen Erreger herunter bis auf wenige Millimeter Wellenlänge, während auf der anderen Seite die ultraroten Wärmestrahlen durch PASCHEN und RUBENS bis hinauf zu hundertel Millimeter Länge nachgewiesen wurden. Diese noch verbleibende kleine Lücke bietet kein wesentliches Hindernis mehr für die Interpolation zu einer Kontinuität der Strahlungen, eine Kurve, welche auf beiden Seiten ihre Fortsetzung erfährt: auf der einen Seite vermittels der sogenannten Teslaschwingungen bis herunter zu den ausserordentlich langwelligen technischen Wechselströmen von mehreren tausend Kilometer Wellenlänge, auf der anderen vermittelst der sogenannten ultravioletten Strahlen, die bis zu $^1/_{10000}$ mm $= {}^1/_{10}\,\mu$ von V. SCHUMANN messend verfolgt wurden, zu den voraussichtlich noch kurzwelligeren Röntgenstrahlen, welche alle Eigenschaften besitzen, die HELMHOLTZ für äusserst kurzwellige elektromagnetische Strahlen vorausgesagt hat.

Das Auffinden dieser Strahlungsart durch RÖNTGEN im Jahre 1895 erregte grosses Aufsehen infolge ihrer Eigenschaft Körper, welche für gewöhnliche Lichtstrahlen undurchsichtig sind, bis zu ziemlich grossen Dicken durchdringen zu können. Hierzu kam noch der Umstand, dass diese Röntgenstrahlen zwar der unmittelbaren Wahrnehmung durch das menschliche Auge nicht zugänglich, aber indirekt durch Einwirkung auf photographische Platten, oder — praktisch bedeutungsvoller — durch Erregung von Phosphorescenz-Schirmen sichtbar gemacht zur Durchforschung des Inhaltes vieler an sich undurchsichtiger Gegenstände, wie z. B. des menschlichen Körpers, Verwendung finden können.

Obwohl die Natur der Röntgenstrahlen trotz vieler an die Arbeiten des Entdeckers anschliessender Untersuchungen immer noch nicht unzweideutig festgelegt werden konnte, und die zur Wellenlängenbestimmung herangezogenen vermeintlichen Interferenzstreifen wohl mit Recht angezweifelt und als nichtbeachtete optische Nebenerscheinungen anderweitig gedeutet wurden, so muss man es auf Grund der Haupteigenschaften der Röntgenstrahlung doch als in hohem Grade wahrscheinlich ansehen, dass man es hierbei mit einer sehr kurzwelligen transversalen Schwingungserscheinung zu thun hat, welche an das Ende der optischen Strahlungen anzureihen ist. Geweckt würde dieselbe durch die Stösse der auf gewisse feste Körper — namentlich Platin — auftreffenden Kathodenstrahlen. Die Umsetzung der Energie der elektrischen Kathodenströmung bestehend aus rasch bewegten materiellen Partikelchen (vgl. 79) würde also an jenem festen Körper, der sogenannten Antikathode, erfolgen und die Erzitterungen desselben, welche durch das rasch aufeinanderfolgende Aufstossen jener Partikelchen hervorgerufen werden, würden das Ausgehen jener kurzwelligen Röntgenschwingungen von der Antikathode be-

dingen neben ausserdem noch vorhandenen, einfach reflektierten Kathodenstrahlen. Dies führt bereits hinüber auf ein anderes Forschungsgebiet, welches das Wesen der elektrischen Leitung von Gasen umfasst.

36. Leitung in festen Körpern und Flüssigkeiten.

Hatte die Forschung durch Erweiterung der Untersuchungen über die verschiedenen elektrischen Ausgleichformen zur Optik hinübergeleitet, so brachte sie auf der anderen Seite durch Verfolgung der verschiedenen Arten von Leitung der Elektrizität eine engere Verbindung mit dem Gebiet der Chemie. Diese erfolgt dadurch, dass nach Untersuchung der elektrischen Leitung in Metallen, Legierungen und überhaupt „Leitern erster Klasse" der Elektrizität die Erscheinungen des elektrischen Ausgleiches auch bei Einschaltung flüssiger und gasförmiger Strecken in den Stromkreis unter den verschiedensten Verhältnissen näher untersucht wurden.

Die Erscheinungen der sogenannten metallischen Leitung war zwar bereits in der vorausgegangenen Periode, namentlich durch die Arbeiten von Ohm, auf eine sichere Basis gestellt worden, dennoch blieb auch hier noch Vieles zu klären. Ja trotz der sogleich zu erwähnenden Bereicherung unserer Kenntnisse auf diesem Gebiet in der letzten Periode, erscheint das Wesen der metallischen Leitung gerade infolge der grossen Fortschritte auf dem Gebiete der elektrischen Leitung in Gasen und der dadurch bedingten neuen Auffassungen über elektrische Ausgleichvorgänge für den Physiker am Anfang des neuen Jahrhunderts rätselhafter als je. Schrecken doch einige hervorragende Forscher auf dem Gebiete der Gasentladungen nicht zurück vor einer krass materiellen Auffassung auch der metallischen Leitung, indem sie sich die Elektronen (Mikroionen, Corpusküle) der Kathodenströmung auch durch den Leiter strömend denken und so eigentlich direkt auf die Maxwellschen Hülfsvorstellungen der Friktionsteilchen zurückgehen (vgl. **79**).

Halten wir uns aber hier zunächst an die unmittelbaren Erscheinungen und Beobachtungen, so machte die Berücksichtigung des Wechselstromstandpunktes zunächst eine Unterscheidung von elektrischem Ausgleichwiderstand $\left(Z = \frac{\dot{E}}{\dot{J}}\right)$ und eigentlichem Leitungswiderstand im Sinne des Ohmschen Leitungswiderstandes $\left(R = \frac{\bar{E}}{\bar{J}}\right)$ erforderlich.

Die Berücksichtigung des Einflusses des magnetischen Feldes oder der Selbstinduktion des Leitungsweges auf die Ausgleicherscheinungen bei Wechselstrom, bezw. auf den Wechselstromwiderstand (Z) durch Maxwell (1873) wird hierbei ergänzt durch die Erkenntnis der sogenannten Oberflächenwirkung (Skineffekt) bei schwingendem Ausgleich durch Raleigh (1886) und W. Thomson (1889). Sehr drastisch trat die Oberflächenwirkung bei den Versuchen von Tesla (1893) mit Wechselströmen hoher Wechselzahl in die Erscheinung und erregte dadurch die Aufmerksamkeit weiterer Kreise. (Weiteres siehe H. I, 2.)

Scheiden wir die von Leiterform und Leitungsführung abhängigen Koeffizienten und ihren Einfluss auf die elektrischen Ausgleicherscheinungen ab und wenden uns den reinen Materialeigenschaften der elektrischen Leiter zu, so zeigte sich bei fortschreitender Ausbildung der Messtechnik sehr bald, wie wenig die übliche Materialbezeichnung, wie Kupfer, Eisen, für eine Festlegung eines spezifischen elektrischen Leitvermögens (k) beziehungsweise Widerstandes $\left(\varrho = \frac{1}{k}\right)$ ausreichend war. Der grosse Einfluss der Verunreini-

gungen der käuflichen Metallsorten auf diesen Koeffizienten k wurde erkannt und zuerst von MATTHIESSEN und BOSE (1862) Gewicht auf die Herstellung reiner Metalle bei Bestimmung der elektrischen Materialkoeffizienten gelegt und so die spezifischen Leitvermögen (k) nebst Temperaturkoeffizienten (a) zwischen 0 und 100° C. von den wichtigsten Metallsorten bestimmt. Die hieran anschliessenden Untersuchungen von BÉNOIT (1874) mit Erweiterung der Temperaturkoeffizienten bis 860° C., von H. F. WEBER (1880), OBERBECK und BERGMANN (1887) ergaben aber auch bei sogenannten reinen Metallen und bei verschiedenen Teilen desselben Drahtstückes noch Abweichungen des Materialkoeffizienten k bis zu 25%, welche teils auf Rechnung von doch noch vorhandenen Verunreinigungen geschrieben werden, teils auf Verschiedenheiten des thermisch-mechanischen Vorlebens des Materiales, das unter den schlecht definierbaren Begriffen wie Struktur, molekularen Umlagerungen und dergleichen verborgen ist. Auch hier wurde man darauf hingewiesen, dass es nur ganz ungefähr möglich ist mit einer Materialbezeichnung die elektrischen Leitereigenschaften zu charakterisieren, dass vielmehr die letzteren in Zukunft richtiger als Definition für die Materialbeschaffenheit, genauer einer Seite derselben, heranzuziehen sein werden. Dass das Vorzeichen des Temperaturkoeffizienten bei Kohle entgegengesetzt ist demjenigen der Metalle, war zuerst von MATTHIESSEN (1862) bemerkt, und die Richtigkeit dieser Thatsache gegenüber den Behauptungen anderer Beobachter durch genauere Untersuchungen von WERNER SIEMENS (1874) bestätigt worden. Die Ausdehnung der Untersuchung des Leitvermögens, bezw. des Temperaturkoeffizienten von Metallen auf sehr tiefe Temperaturen wurde zuerst von CAILLETET und BOUTY (1885), sowie im gleichen Jahr von WROBLEWSKY vorgenommen und ergab zusammen mit den späteren Untersuchungen des elektrischen Verhaltens der Metalle bei noch tieferen, von DEWAR erzielten Temperaturen, dass die Widerstandskurven der verschiedensten Metalle bei wachsender Abnahme der Temperatur gegen den Wert Null (des elektrischen Leiterwiderstandes) konvergieren bei einer in der Nähe von — 273° C. gelegenen Temperatur. Das eigentümliche Verhalten von Eisen bei wachsender Temperatur mit einem Sprung bei etwa 855° C. wurde hinsichtlich der Koeffizienten k beziehungsweise a von HOPKINSON (1889) untersucht. Der Einfluss der sogenannten Strukturänderungen durch mechanische Prozesse, wie Kompression, Dehnung, Torsion, dann des für Widerstandsnormale sehr wichtigen Wickelns, ferner des Härtens, Ausglühens, Ablöschens, auf den elektrischen Leitungskoeffizienten wurde in zahlreichen Arbeiten untersucht (vgl. Wk. III a, 274), deren Resultate aber bisher keine durchgreifende Beziehung erkennen lassen.

Der Einfluss der Magnetisierung auf die Leitfähigkeit der Metalle zeigte sich nach den Untersuchungen von RIGHI (1884), ferner ETTINGSHAUSEN und NERNST (1886) besonders auffallend bei WISMUTH, eine Erscheinung, deren Untersuchung durch die Arbeiten von LENARD (1890) zu einem gewissen Abschluss, sowie zu praktischer Verwertung für die Messtechnik gelangte (weiteres vgl. H. I, 2).

Die Klärung und die Fortschritte auf dem Gebiete der elektrolytischen Leitung stellen sich als ungleich bedeutungsvoller und fundamentaler dar als diejenigen der metallischen Leitung.

Eine eigentlich nachhaltige Klärung der Erscheinungen dieses Gebietes erfolgte allerdings auch erst seit Mitte der 80 er Jahre und entsprang, zum Teil

wenigstens, dem alten Kampfe um die „Kontakttheorie". Die Durchdringung der Erscheinungen der elektrolytischen Leitung mit der Arbeitshypothese der Jonisierung und mit der neueren Lösungstheorie über die teilweise Dissoziation der gelösten Salze erwies sich aber nunmehr als so überaus fruchtbar, dass nicht nur die Klärung dieses Gebietes zu einem gewissen Abschluss kam, sondern auch das benachbarte Gebiet der Gasentladungen mit seinem lange Zeit ungeschichteten Haufen von Beobachtungsthatsachen einen längst benötigten Impuls zur Einordnung der letzteren erhielt.

Faraday, der wissenschaftliche Begründer unserer Kenntnisse von der elektrolytischen Zersetzung, hatte die Frage noch offen gelassen, ob nicht neben der elektrolytischen Leitung auch bei Flüssigkeiten noch eine eigentliche — wir sagen jetzt meist metallische — Leitung nebenhergehe. Auch gegenüber dem von Buff (1855) versuchten Nachweis, dass nur elektrolytische, d. h. mit Zersetzung und Jonenwanderung Hand in Hand gehende Leitung bei Flüssigkeiten auftrete, hielt Faraday (1856) in seinem Aufsatz „über elektrische Leitung" auf Grund der Entladungserscheinungen durch feste Salze (vgl. Exp. Res. Bd. III, Seite 576) an der Möglichkeit einer metallischen Leitung fest. Von ausserordentlicher, wenn auch zunächst nicht gewürdigter Bedeutung für die Lösung der Fragen über die elektrische Leitung, waren die in Pogg. Ann. in den Jahren 1853, 1856 und 1859 erschienenen Arbeiten von Hittorf, dessen experimentelle Beobachtungen, ebenso wie seine Vorstellungen über die Wanderung der Jonen in den Lösungen den grössten Einfluss auf die Ausbildung der gegenwärtigen Ansichten hatten. Obwohl dieselben auch in der von Clausius (1857) entwickelten Theorie der molekularen Konstitution der Körper und speziell der Theorie der elektrolytischen Leitung eine entschiedene Unterstützung fanden, so wurden die Konsequenzen der Annahme von Clausius, dass in elektrolytisch leitenden Flüssigkeiten ein Teil der Molekeln in die Jonen zerfallen sei, doch erst 30 Jahre später durch Arrhenius und andere gezogen, nachdem durch die zahlreichen ausführlichen Untersuchungen von F. Kohlrausch und seiner Schüler in den Jahren 1869 bis 1879 über die Leitungsfähigkeit von Lösungen ein reiches Zahlenmaterial und einige weitere wichtige Sätze geliefert worden waren. Das Hauptergebnis der Untersuchungen von Kohlrausch, dass die Abhängigkeit der Leitung nicht vom Prozentgehalt, sondern vom Molekulargehalt der betreffenden Lösungen abhänge, führte ihn schliesslich zur Aufstellung des Gesetzes von der unabhängigen Wanderung der Jonen. Dieses besagt, dass in verdünnten Lösungen jedem Radikal, d. i. elektrochemischen Element, wie Wasserstoff, Chlor, Silber, beziehungsweise jedem Säurestamm, wie NO_3, $C_2H_3C_2$, ein ganz bestimmtes Leitvermögen, sowie eine bestimmte Wanderungsgeschwindigkeit zukomme, gleichgültig, aus welchem Elektrolyt dasselbe stamme. In Erweiterung dieses Ergebnisses wies Arrhenius zunächst (1884) nach, dass in äusserst verdünnten Lösungen alle Elektrolyte ein spec. Leitvermögen von gleicher Grössenordnung besitzen und sprach im Zusammenhang hiermit und gleichsam als Erklärung hierfür seine an Clausius angeknüpfte berühmte Dissoziationshypothese aus, dass in diesen stark verdünnten Lösungen nahezu alle Moleküle des Elektrolyts dissoziiert seien. Die Verallgemeinerung auf konzentrierte Lösungen führte ihn zu der Ansicht, dass die Zahl der zerlegten (dissoziierten) Moleküle und die Zahl der unzerlegten insofern im Gleichgewicht stehen, als für bestimmte Temperatur, Konzentration und Salzart die Zerlegung und Neu-

bildung von Molekülen in der ganzen Lösung stets dieselbe Grösse besitzt, sowie dass die Zahl der in der Lösung vorhandenen zerlegten Molekel von jenen drei Faktoren abhängt. Der von ihm hieraus gezogene wichtige Schluss, dass elektrolytische Leitung und Dissoziation insofern aufs Engste miteinander verknüpft seien, als zu der Elektrizitätsleitung nur die Jonen, d. h. die zerlegten Moleküle beitragen, sodass in jeder Leitung zweierlei Arten Moleküle zu unterscheiden sind, nämlich (für die elektrolytische Leitung) aktive (a) oder in Jonen zerspaltene, und passive (b) oder unzerlegte, führte ihn zwar zu dem wichtigen Begriff des Aktivitätskoeffizienten der Lösung $\alpha = \frac{a}{a+b}$, doch vermochte dieser qualitative und rein begriffliche Fortschritt, wie meist in derartigen Fällen, den Umschwung zu gunsten der neuen Theorie noch nicht herbeizuführen. Diese, mit Ausnahme von W. Ostwald, zunächst wenig beachteten und von letzterem nach Richtung des chemischen Affinitätskoeffizienten weiter ausgebauten Betrachtungen konnten erst durch die ergänzende Beweisführung in quantitativer Richtung ausschlaggebend wirken.

Ausgelöst wurde diese wichtige und entscheidende Ergänzung durch die äusserst fruchtbare Lösungstheorie des osmotischen Druckes, welche J. H. van't Hoff auf Grund der Analogie zwischen dem gelösten und gasförmigen Zustande formulierte. Auf zahlreiche Beobachtungen gestützt und ursprünglich in Erscheinungen der Botanik, nämlich dem Verhalten der Pflanzensäfte wurzelnd besagt diese Theorie, dass eine Grammmolekel eines beliebigen Stoffes gleichförmig in einem gegebenen Raume verteilt genau den gleichen Druck auf die Wände des Raumes ausübt, sei es dass der Stoff als Gas oder in einer Flüssigkeit gelöst vorliegt und zwar unabhängig von der Natur des Körpers und des Lösungsmittels. Das wichtigste Lösungsmittel, nämlich Wasser, wies aber hiervon erhebliche Abweichungen in Form zu grosser Drucke auf, welche der Erklärung Schwierigkeiten boten und vorläufig von van't Hoff durch Hinzufügung eines Erfahrungskoeffizienten i formal berücksichtigt wurden. Die Lösung dieser Schwierigkeiten gleichzeitig unter Benutzung dieses experimentellen Faktors i zu der zahlenmässigen Bestimmung des obigen Aktivitätskoeffizienten oder auch der Dissoziationskonstanten α wurde nun alsbald (1887) durch Arrhenius an der Hand vielfältigen Zahlenmaterials aufgefunden und sicherte in Verbindung mit zahlreichen Arbeiten W. Ostwalds innerhalb der nächsten zwei Jahre das Fundament der heutigen Auffassung der elektrolytischen Leitung und weiterhin durch die folgenreiche Arbeit Nernsts (1889) über die elektromotorische Wirkung der Jonen (Z. f. ph. Ch. 4, 129) die Lösung des vielumstrittenen Problems der Voltakette. (Weiteres siehe 83 u. ff. im dritten Abschnitt.)

37. Leitung in Gasen.

Auf wenigen Gebieten der Physik dürfte soviel gearbeitet worden sein, als auf dem Gebiet der Gasentladungen und der Leitung von Flammengasen, sei es, dass die bei jenen auftretenden Leuchterscheinungen als direkte Wirkungen des elektrischen Ausgleichs eine besondere Anziehung auf die Experimentatoren ausübten, sei es, dass man schon seither die dunkle Empfindung hatte, dass die Gasentladungen zur Aufklärung über das Wesen der Elektrizität den besten und nächstliegenden Angriffspunkt bilden. Dennoch war das Resultat der äusserst zahlreichen Untersuchungen und des stark gehäuften Beobachtungsmaterials bis gegen Schluss des Jahrhunderts ein wenig erfreuliches, denn man hatte das Gefühl, dass der leitende Faden

noch fehle, um in die Fülle des sich zum Teil scheinbar widersprechenden Erfahrungsmateriales Ordnung zu bringen. Der Hauptgrund lag wohl in dem anfänglichen Fehlen einer allgemeiner angenommenen leitenden Arbeitshypothese, wie sie zuletzt in Gestalt der aus der Lösungstheorie auf die elektrische Leitung der Gase übertragenen Dissociationshypothese oder Hypothese der freien Jonen gefunden wurde. Hierzu kam noch der Umstand, der übrigens auch heute noch vielfach eine weitere Klärung erschwert, dass die Rückschlüsse aus den beobachteten Lichterscheinungen auf die elektrischen Grössen als Ursache sehr unsicher sind, und Nachprüfungen von Annahmen hierüber durch genauere quantitative Messungen fast gar nicht ausgeführt wurden, meist auch vorerst nicht ausführbar waren. Dies hatte wieder darin seinen Grund, dass die Messtechnik der in Frage kommenden elektrischen Hauptgrössen, namentlich auch der wahren elektrischen Leistung, den Physikern nur für stationäre Gleichstromverhältnisse geläufig war, nicht aber für die hier überwiegend — wenn nicht stets — vorliegenden Wellenstromverhältnisse der stossweisen oder doch wenigstens undulierenden Ausgleichvorgänge, deren Messung weiterhin noch durch die Unregelmässigkeiten und Eigentümlichkeiten der meist benutzten Stromquellen wie Induktorien, Influenzmaschine, Wasserbatterien und dergleichen teils erschwert, teils illusorisch gemacht wurde. Eine weitere Schwierigkeit für die Sichtung der Erscheinungen durfte nach unserer heutigen Kenntnis wohl auch in der vielfach vorhandenen Übereinanderlagerung verschiedener Strahlungen und ihrer Wirkungen zu suchen sein, es sei hierbei nur an diejenige der wesentlich verschiedenen Kathodenstrahlen und Röntgenstrahlen erinnert (vgl. **35**).

Nimmt man zu den hieraus sich ergebenden Mannigfaltigkeiten noch die weitere hinzu, welche sich für den Ausgleichcharakter ans der Verschiedenheit der Entladungsgefässe und speziell — nach den Erscheinungen beim elektrolytischen Unterbrecher mit Hülfe der Analogie zu schliessen — aus dem Wechsel der Gefäss q u e r s c h n i t t e ergiebt, sowie weiterhin den komplizierenden Einfluss der durch Reflexion und sekundäre Erscheinungen aller Art, namentlich Ladungen, mitwirkenden Gefäss w a n d u n g e n, so muss man auf der anderen Seite eigentlich über die trotz aller dieser Schwierigkeiten erzielten Ergebnisse der Forscher auf diesem Gebiete erstaunt sein. Namentlich war es in den ersten Jahrzehnten unserer Periode wiederum Hittorf, welcher die Erscheinungen der Gasentladungen, das Verhalten des Glimmlichtes, die Phosphorescenzerregungen der Kathodenstrahlen für verschiedene Gase, Drucke, Formen des Entladungsrohres und der Elektroden untersuchte. Ein genaueres Eingehen auf die Richtungen, nach denen sich die Arbeiten der einzelnen Forscher erstreckten, würde hier bereits zu weit führen. Unter Hinweis auf die Ausführungen im späteren Teil dieses Bandes, ferner auf die Ergebnisse der älteren Arbeiten bis zum Jahre 1892 nebst Litteraturangabe in Wk. III a, 325 u. ff. und endlich auf die für Interessenten höchst wertvolle Spezialabhandlung von J. J. Thomson über „die Entladung der Elektrizität durch Gase“ (Leipzig, J. A. Barth, 1900), möge hier nur eine kurz zusammenfassende Übersicht genügen. Um zunächst diejenigen Forscher, welche neben vielen anderen sich spezieller diesem Gebiet gewidmet und dasselbe wohl am meisten gefördert haben, noch mit dem ungefähren Zeitpunkt ihrer beginnenden Mitwirkung namhaft zu machen, so wäre auf dem Gebiet der Kathodenstrahlen bis zum Anfang der neunziger Jahre besonders neben Hittorf (1859) noch Goldstein (1876), Crookes (1879),

H. Hertz (1892) und Lenard (1893), sowie weiterhin auf dem Gebiet der Gasentladungen überhaupt ausser den Vorgenannten E. Wiedemann (1879) und Ebert (1888), Elster und Geitel (1882), Jaumann (1888) und J. J. Thomson (1890) nebst mehreren seiner Schüler zu nennen.

Ein besonderes Interesse bietet die Entwickelung, welche die Kathodenstrahlenforschung genommen hat. Goldstein, von welchem die Bezeichnung Kathoden*strahlen* herrührt, hatte sie auf Grund der zuerst von Plücker (1859) beobachteten, dann von Hittorf (1859) näher untersuchten Phosphorescenzerregung der von ihnen getroffenen Glasteile als Wellen im Äther angesprochen, für deren Fortpflanzung das Gas nicht nötig ist. Crookes, der (1879) zuerst die mechanischen Wirkungen der Kathodenströmung erforschte, sowie auch ihre bereits von Plücker und Hittorf bemerkte Ablenkbarkeit durch den Magnet näher untersuchte, sprach seine Überzeugung dahin aus, dass diese sogenannten Strahlen in Wirklichkeit eine Strömung aus negativ geladenen materiellen Teilchen (sein sogenannter vierter Aggregatzustand) seien, welche in senkrechter Richtung von der Kathode mit grosser Geschwindigkeit fortgeschleudert würden. Diese Anschauung wurde lange Zeit in Physikerkreisen gern als etwas naiv belächelt und namentlich unter dem Eindruck der Versuche von H. Hertz über die elektrischen Schwingungen als überwunden angesehen, namentlich nachdem es Lenard (1893) gelungen war die Kathodenstrahlen durch ein dünnes Aluminiumfenster hindurch nach aussen zu bringen und ausserhalb des Entladungsrohres in Luft von Atmosphärendruck bis auf einige Centimeter Entfernung photographische und phosphorescierende Einwirkungen derselben nachzuweisen. Diese Durchlässigkeit dünner Metallhäute für Kathodenstrahlen hatte bereits H. Hertz (1892) an dünnen Goldhäuten nachgewiesen, und sie bestimmte ihn ebenso wie Lenard diese Strahlen für Ätherschwingungen anzusprechen. Dieser autoritative Einfluss war aber im vorliegenden Fall nur von kurzer Dauer, und die fortgesetzten Untersuchungen der Eigenschaften der Kathodenströmung, namentlich die quantitativen Messungen über ihre Ablenkung im magnetischen und elektrischen Felde führten immer nachdrücklicher zu den Anschauungen von Crookes zurück. Etwas abgeändert (vgl. **79**) wurde diese Auffassung namentlich von J. J. Thomson und seinen Schülern festgehalten und unter dem Namen Corpusculartheorie mit grossem Erfolg als Arbeitshypothese benutzt und auch später von Lenard (vgl. 1898 W. A. 64, 280) angenommen. Der heutige Standpunkt der Physiker zu den Kathodenstrahlen wird durch folgende Worte Eberts (vgl. Einführung zu J. J. Thomson) gekennzeichnet:

Es kann heute kaum mehr einem Zweifel unterliegen, dass die Strahlen, die früher nur in dem schwer zugänglichen hohen Vacuum der Geisslerschen Röhren erhalten waren, die aber Lenard durch ein dünnplattiges Metallfensterchen in den freien Luftraum herauslockte, aus fortgeschleuderten, negativ elektrischen Teilchen bestehen. Die Träger dieser negativen elektrischen Ladungen müssen aber von einer solchen Kleinheit sein, dass ihr Gewicht nur etwa den tausendsten Teil von demjenigen eines Wasserstoffatomes beträgt. Wir werden hier also auf eine ungeahnte Feinheit in der Aufteilung der Materie geführt, während auf der anderen Seite die schon von Helmholtz aus den Faradayschen Gesetzen der Elektrolyse gezogene Schlussfolgerung über die atomistische Natur der Elektrizität immer mehr Boden zu gewinnen scheint.

Wie einschneidend gerade die Forschungsergebnisse auf dem Gebiet der Kathoden*strömung*, wie wir mit Rücksicht auf ihren *materiellen* Charakter jetzt wohl besser sagen würden, auf unsere Auffassung über das Wesen der Elektrizität zu werden versprechen, kann hiernach leicht ermessen werden.

Die Frage: wie wird ein Gas elektrisch leitend und woher kommt es, dass unter gewöhnlichen Verhältnissen es kaum möglich ist einem Gas eine Ladung zu erteilen, während die Entladung bezw. Leitung durch gewisse Beeinflussung des Gases photoelektrischer Natur, sowie auch bei entsprechender Gasverdünnung beträchtliche Werte annimmt, trifft den Kernpunkt der Gasentladungen. Auch sie scheint durch die aus der Elektrolyse herübergenommene Jonisierunghypothese in Verbindung mit der obigen Schlussfolgerung über die weitere „Aufteilung der Materie" nebst zugehörigen freien elektrischen Ladungen der Elektronen (Corpusküle, Mikroionen) der Lösung näher gerückt. Wenigstens haben die zahlreichen photoelektrischen Untersuchungen der Jahre 1887—1899 (vgl. die Litteraturzusammenstellung von Ebert in J. J. Thomson, Seite 40 und 41), welche sich an die zuerst (1887) von Hertz gemachte Beobachtung anschlossen, dass die Bestrahlung mit ultraviolettem Licht die dielektrische Festigkeit einer Funkenstrecke vermindere, d. h. den disruptiven Ausgleich in Gestalt eines Funkens erleichtere, eine einheitliche Erklärung erfahren. Leitung von Gasen würde hiernach unbedingt, ähnlich wie bei der elektrolytischen Leitung von Flüssigkeiten, eine vorhandene oder vorausgehende Jonisierung des Gases, d. h. Zerspaltung der elektrisch indifferenten und sonach nichtleitenden Gasmolekeln in zwei elektrisch aktive, das elektrisch positive Hauptmolekül und das elektrisch negative Corpuskel (Elektron, Mikroion) voraussetzen. Alle Strahlungen nun, welche eine Gasstrecke entweder direkt, wie die Röntgenstrahlen und Kathodenstrahlen, oder indirekt, wie die ultravioletten Strahlen, bei Auftreffen auf die Elektrodenmetalle bezw. Reflexion an denselben, in dem soeben erwähnten Sinne „jonisieren", werden ein Leitendmachen im Verhältnis dieser „Dissociation" verursachen.

Die Erscheinung einer durch die Zahl der freien Jonen begrenzten Leitfähigkeit, d. h. die Abweichung vom Ohmschen Gesetz und bei beliebiger Steigerung der treibenden EMK das Vorhandensein einer Sättigungsstromstärke, welche J. J. Thomson (1896) bei stationärer Zufuhr freier Jonen nachwies, ebenso wie die Zerstörung der Leitfähigkeit durch den Strom, d. h. das Vorhandensein einer begrenzten Leitungskapazität ohne Zufuhr neuer Jonen, bildet eine Stütze der obigen Auffassung. Eine weitere bildet die Auffindung (1896) der jetzt nach ihrem Entdecker H. Becquerel (Sohn von A. E. Becquerel und Enkel von A. C. Becquerel) genannten „Strahlen", sowie die Phosphorescenz erregende Wirkung einer Reihe aus Uranpecherz gewonnener „radioaktiver Substanzen", wie Radium und Polonium, welche durch das Ehepaar Curie und durch Giesel (1899) dargestellt im magnetischen Feld eine ähnliche Ablenkbarkeit ihrer Ausströmungen wie die Kathodenstrahlen zeigen und (als nächstliegende Erklärung) auf einen grossen Reichtum von elektrisch aktiven Teilchen, d. h. Jonen bezw. Mikroionen hinweisen, die von ihnen ausgeströmt oder auch ausgestrahlt werden. Alle diese Erscheinungen legten es nahe auch in der freien Atmosphäre unserer Erde nach derartigen „freien Jonen" zu suchen und thatsächlich gelang es dem auf dem Gebiet der Erdelektrizität schon, früher so überaus erfolgreichen Forscherpaar Elster und Geitel (1899) auch hier überraschende Ergebnisse auf dem Gebiet der Elektrizitätszerstreuung zu erzielen, welche — abweichend von dem durch Coulomb aufgestellten Zerstreuungsgesetz — abhängig von der geographischen Lage und Höhe über dem Meere auf das Vorhandensein freier Jonen, d. h. aktiver elektrischer Partikelchen in der Erdatmosphäre mit grosser Wahrscheinlich-

keit hinweisen, denen diese Entladung durch sogenannte Zerstreuung zuzuschreiben wäre. Die direkte oder indirekte Beteiligung der Sonnenstrahlung an dieser Jonenbildung, sowie der Zusammenhang jener freien Jonen mit den Nordlichtern u. s. w. bleiben zwar noch aufzuhellen, immerhin ist es wichtig, dass auch die bisher wenig geklärten elektrischen Erscheinungen und Zustände unserer Erdatmosphäre durch jene Arbeitshypothese der freien elektrischen Jonen mit den Gasentladungserscheinungen in Verbindung gebracht wurden und beide einen kräftigen Impuls für weitere Forschungen und Aufklärungen erhalten haben. Ob jene Auffassung der freien Jonen in der Wissenschaftsentwickelung nur einen mehr vorübergehenden, gleichsam gerüstartigen Wert besitzt, oder bleibende Teile in dem Aufbau unseres Wissenschaftsgebäudes zurücklassen wird, lässt sich vorläufig noch nicht mit Sicherheit entscheiden, jedenfalls hat sie sich bereits jetzt als Arbeitshypothese sehr fruchtbar erwiesen. (Weiteres siehe im zweiten Abschnitt (**79**) sowie H. I, 2.)

Überblickt man die Entwickelung der Elektrophysik im letzten Jahrzehnt, so muss auffallen, dass die epochemachenden Untersuchungen von H. Hertz, welche unter endgültiger Beseitigung der Fernwirkungstheorie die Auffassung der elektrischen Vorgänge rein bewegungs-mechanisch zu gestalten und alle elektrischen Ausgleicherscheinungen im Sinne der Schwingungsstrahlungen deuten zu wollen schienen, so rasch zum Abbau geführt und sich für weitergehende Aufschlüsse — vorläufig wenigstens — als weniger fruchtbar erwiesen haben, sich sonach als eine Art-Schlussstein dieses wissenschaftlichen Gebäudeteiles darstellen. Es muss auf der anderen Seite überraschen, dass diese kinetische Auffassung und Behandlung der elektrischen Erscheinungen so schnell einer Betrachtung der letzteren von einem nahezu gegensätzlichen Standpunkte, wie ihn die materielle Jonenhypothese mit ihrem Strömungsausgleich [1]) darstellt, Platz machen musste, und dass diese Betrachtungsweise durch ihre Fruchtbarkeit dermassen in den Vordergrund des Interesses trat, dass sie bei den meisten Physikern gegenwärtig kaum noch Raum für andere Auffassungen zu bieten scheint.

Bedenkt man aber, dass jene beiden Auffassungen sich eigentlich auf zwei verschiedene Gebiete der elektrischen Erscheinungen beziehen, so dass die eine nicht notwendig die andere auszuschliessen braucht, so zeigt sich auch hier wieder, dass es sich nicht um Gegensätze, sondern um Ergänzungen handelt, und dass der zeitweilige Wechsel des Standpunktes der Betrachtung, selbst wenn er wie hier ziemlich extrem erscheinen muss, doch fruchtbar sein kann und zur Vermeidung einer Stagnation in der Wissenschaftsentwickelung sogar notwendig zu sein scheint.

38. Ausgleichstösse und Erscheinungen an Leitungsübergängen.

Die als kontinuierlich erscheinenden Ausgleichvorgänge, oder Entladungen, bei denen der intermittierende Charakter durch Übereinanderlagerung einer grossen Zahl von differentiellen Ausgleichvorgängen mit diesem Charakter zum mindesten verschwindet, werden hinsichtlich der Ausgleichform und aller damit zusammenhängender Erscheinungsseiten praktisch eine Unterscheidung von den Ausgleichvorgängen mit mehr oder weniger stossweisem Charakter veranlassen, wenn auch hier keine scharfen Grenzen vorliegen, sondern alle Arten von Übergängen auftreten. Je nachdem in diesen Ausgleich-

---

1) Als Gegensatz zu den Schwingungsstrahlungen könnte man hier von Strömungsstrahlungen sprechen, doch passt die Bezeichnung Strahlung für die heutige Auffassung dieser Vorgänge nach Art der Kathodenstrahlen überhaupt nicht mehr recht.

vorgängen mit Wellenstromcharakter — d. h. einer Mischung aus einseitig gerichteter Strömung mit einem mittleren Ausgleichniveau (Gleichstromniveau) und aus einer aufgelagerten Wechselströmung — die erstere verhältnismässig sehr überwiegt, oder praktisch vernachlässigbar ist, wird eine Abstraktion in Richtung des stationären Gleichstromes, oder des reinen Wechselstromes (ohne einseitige Strömungswirkung) naheliegen.

Aus diesem Grunde wird zu unterscheiden sein zwischen Ausgleichstössen mit einseitig verlaufender (fortschreitender) Strömung, ferner Schwingungsstössen mit mehr oder weniger rascher Dämpfung durch Ausstrahlung oder durch Umwandlung in andere Energieformen, und endlich den gemischten Ausgleichstössen mit Wellenstromcharakter.

Der stossartige Schwingungsausgleich mit seinen Dämpfungsverhältnissen abhängig von den Leitermetallen ist im Anschluss an die Untersuchungen von Hertz namentlich von Bjerknes (1891) erforscht worden (vgl. H. I, 2). Die beiden anderen Ausgleicharten mit stossweisem Charakter, welche u. a. bei allen periodischen Stromunterbrechern vorliegen, haben mit ihren mannigfaltigen Erscheinungsseiten die physikalische Forschung dieser Periode wiederholt, namentlich aber gegen Schluss beschäftigt. Das Gebiet dieser Ausgleicherscheinungen ist deshalb ein so umfangreiches, weil ihm die meisten Übergangserscheinungen angehören bei Zusammensetzung der Leiterbahn aus Strecken von verschiedenem Aggregatzustande, genauer aus metallischen, elektrolytisch-flüssigen und gasförmigen Leitern. Namentlich gehört hierher die Gruppe von Erscheinungen, welche durch eine hochgradige Variabilität der Ausgleichwiderstände hervorgerufen wird, soweit diese Variation durch die elektrische Strömung selbst veranlasst wird, sei es, dass letztere die Zahl der freien Jonen und damit die Leitfähigkeit durch den Ausgleich selbst stark vermindert, sei es, dass auf eine andere Weise, z. B. durch Vergasung oder Verdampfung die Überführung eines Leiterkreisstückes aus dem flüssigen, relativ gut leitenden in den gasförmigen, relativ schlecht leitenden Aggregatzustand erfolgt.

In allen diesen Fällen schafft sich der eingeleitete Ausgleich eine starke Widerstandsvergrösserung bis zur Selbstunterbrechung gewissermassen selbst, ein Vorgang, der bei periodischer Wiederkehr unter Hinzutritt der übrigen aus starken Stromstärkeänderungen resultierenden Erscheinungen wie diejenigen der Selbstinduktion und eventuell der Resonanz eigentümliche Ausgleichverhältnisse hervorruft.

Bezeichnet man diese elektrischen Ausgleichwiderstände mit automatisch periodischer Variabilität nach einem Vorschlage von Heinke als Wellenstromerreger zweiter Ordnung (vgl. 1900 A. d. Ph. I, 460), so würden die elektrischen Übergangserscheinungen, d. h. die Erscheinungen beim Übergang der elektrischen Strömung von einer Leiterart zur anderen etwa in folgender Reihenfolge für die Entwickelung in Betracht kommen, wenn auf die elektrochemischen Vorgänge, wie Zersetzung des Elektrolyten, beziehungsweise Bildung von neuen chemischen Verbindungen oder von Metallniederschlägen hier nicht näher eingegangen wird. Die Kombination von festen metallischen Leitern und Elektrolyten mit relativer Kleinheit der metallischen Austrittsoberfläche erzeugt an der kleineren Elektrode nach Erreichung einer Sättigungsstromstärke bei weiterer Steigerung der zugeführten Spannung eine so starke Gasentwickelung, dass sich der Ausbreitungswiderstand sehr stark vergrössert, die Wärmeentwickelung an dieser Stelle daher bis zur Verdampfung der Flüssigkeit getrieben und eine sehr starke periodische Wider-

standsänderung durch die automatisch eingeschaltete Gasschicht, meist in Verbindung mit einer Gasentladung herbeigeführt wird. Diese Erscheinungen mit ihren Licht und Wärmeeffekten, welche bis zum Schmelzen des Elektrodenendes gehen, wurden zuerst von PLANTÉ bei seinen Akkumulatorstudien (1859 bis 1879 verarbeitet in seinem Werk „Recherches sur l'électricité") beobachtet und beschrieben, später für das Schweissverfahren von LAGRANGE und HOHO praktisch zu verwenden gesucht, von RICHARZ (1890) bei Untersuchungen über Polarisation wiederum beobachtet, endlich von WEHNELT (1898) für einen elektrolytischen Unterbrecher mit Unterbrechung an einer Platinelektrode als kleinstem elektrolytischen Leitungsquerschnitt und bald darauf von H. TH. SIMON (1899, vgl. ETZ, 440) für einen sogenannten Lochunterbrecher benutzt unter Verlegung des (kleinsten) Unterbrecherquerschnittes in die Mitte des Elektrolyten mit Hülfe einer durchlochten Glaswand. Der Wellenstromcharakter wurde durch Untersuchungen von HEINKE (1899) aufgedeckt und in messtechnischer, sowie energetischer Beziehung geklärt.

Zu den Übergangserscheinungen gehören auch die Polarisationserscheinungen, welche die Physiker in dieser Periode stark beschäftigt haben (vgl. die Litteraturzusammenstellung in Wk. IIIa, 518 u. ff.), ohne jedoch einen befriedigenden Abschluss zu erhalten, bis auch hier die obenerwähnte Dissoziationshypothese im letzten Jahrzehnt einige Klärung brachte.

Die Untersuchungen in den ersten Jahrzehnten mit ihren Bemühungen die Grösse der Polarisation und namentlich des Polarisationsmaximums zu messen, sind, abgesehen von den Verschiedenheiten der Ergebnisse, deshalb wenig von bleibendem Wert, weil der zusammengesetzte Charakter der Übergangserscheinungen aus wahrer Polarisation, Übergangswiderständen von dünnen Gas- oder Oxydschichten, Ausbreitungswiderstand von dem gewöhnlich weit kleinerem Querschnitt der Elektrodenoberfläche in den grösseren der umgebenden Flüssigkeit, nicht richtig erkannt und gewürdigt wurde.

Nachdem FECHNERS (1831) und POGGENDORFS (1841) (vgl. **18**) einseitige Annahme eines Übergangswiderstandes ohne eigentliche Polarisation durch den Nachweis beseitigt war, dass die Elektroden nach dem Unterbrechen des ursprünglichen Stromes selbst als Spannungsquelle dienen und mit einem Galvanometer in Verbindung gebracht in diesem einen Strom in umgekehrter Richtung erzeugen, also eine wirkliche Gegen-EMK besitzen, neigte man dem anderen Extrem zu den verursachten Spannungsabfall fast gänzlich als Gegen-EMK oder Polarisation aufzufassen.

Die erdachten verschiedenen Methoden zur Messung der Polarisation waren aber alle nicht ganz einwurfsfrei (vgl. PIRANI 1884, W. A. 22, 73). Einen Grund für die wenig übereinstimmenden Werte, namentlich des von vielen Forschern untersuchten Polarisationsmaximums, ergaben zunächst die Untersuchungen von FROMME (1888—1890), welche die Abhängigkeit von der Grösse der Elektroden und der Konzentration der Säure nachwiesen, bis LEBLANC (1891) allgemeiner zeigte, dass ein eigentliches Polarisationsmaximum gar nicht existiere, hingegen ein anderer Spannungswert, der sogenannte Zersetzungswert, von Bedeutung sei, bei welchem ein d a u e r n d e r Strom und eine dauernde Zersetzung eintrete, während bei allen geringeren Werten nur ein vorübergehender Strom s t o s s eintritt, der — ähnlich wie bei einem Kondensator oder Kabel — zur Ladung der HELMHOLTZschen Doppelschicht (1882) am Übergangsquerschnitt zwischen Elektrode und Flüssigkeit erforderlich ist. Auf diese

niedrige Zersetzungsspannung, eine Art Polarisationsminimum, hatte zuerst HELMHOLTZ (1888) hingewiesen.

Die Theorie der elektrischen Doppelschichten ist von HELMHOLTZ (1882) zuerst zur Erklärung des Zusammenhanges von Polarisation und Kapillarspannung beim Quecksilber entwickelt worden, eine Erscheinung die von LIPPMANN (1873) zuerst beobachtet und später für die Konstruktion des Kapillarelektrometers benutzt wurde, während PASCHEN, veranlasst durch die Theorie von HELMHOLTZ und Untersuchungen von OSTWALD (1887), sie für seine verbesserte Form der Tropfelektroden (1890) verwertete, die für die Elektrometrie Wichtigkeit erlangt haben (siehe auch unter **85**, Fig. 32).

Die Verteilung der Polarisationswerte auf die Anode und Kathode ist namentlich von STREINTZ (1887 u. ff.) untersucht worden, später (1893) von LEBLANC, welcher gestützt auf die neuere Lösungstheorie (vgl. **83**) nachwies, dass die Kathodenspannung gleich ist dem Lösungsdruck des niedergeschlagenen Metalles in Volt ausgedrückt, sowie, dass den Elektroden keine „spezifische Anziehung für die Elektrizität“ zugeschrieben werden kann. STREINTZ untersuchte auch den technisch wichtigen Spezialfall der Polarisationsverhältnisse am Bleiakkumulator näher, ebenso wie am polarisierten Voltameter mit Aluminiumelektroden. Diese Aluminiumzellen wurden für eine technisch verwertbare Umwandlung von Wechselstrom in gleichgerichteten Strom fast gleichzeitig von POLLAK und von GRAETZ (1897) in Vorschlag gebracht, wenn auch bisher ohne Erfolg; doch ist zu bemerken, dass das eigentümliche Verhalten des Aluminiums mit einer scheinbaren Polarisationsspannung bis gegen 20 Volt an der Anode nach den Untersuchungen von STREINTZ keiner eigentlichen Polarisation, sondern der Bildung eines Übergangswiderstandes durch eine schlecht leitende dünne Oxydschicht zuzuschreiben ist. Die hierdurch entstehende Ventilwirkung, welche die Grundlage für den oben erwähnten Vorschlag bildet und die Einseitigkeit des elektrischen Ausgleiches, das ist hier die Gleichrichtung bedingt, findet sich gleichfalls, wenn auch in viel schwächerem Masse, durch andere Ursachen hervorgerufen, z. B. bei sehr starker Verschiedenheit der Elektrodenoberflächen.

Diese Ventilwirkung, welche entgegen den Verhältnissen beim gewöhnlichen OHMschen Widerstand, den elektrischen Ausgleich in dem einen Strömungssinne zulässt, in dem anderen hingegen nicht, oder doch wenigstens nur abgeschwächt, hat man auf dem elektrischen Gebiet bei Kombinationen von metallischen Leitern und Elektrolyten, auch elektrolytisch leitenden Gasen, z. B. Flammengasen, ferner festen Leitern, z. B. Seife, mehrfach beobachtet, so nach ERMAN (1802, vgl. **11**) namentlich HITTORF und HANKEL (1859) an der Kathode von Entladungsröhren, ferner HITTORF (1874) an verschiedenen Flammen, ELSTER und GEITEL (1885) an der eine rotglühende Kugel umgebenden Luftschicht. Wie weit Übergangswiderstände, wie weit einseitige Jonisierungsverhältnisse die Ursache dieser Erscheinungen bilden, bedarf noch der weiteren Aufklärung.

Bei der Kombination der Leiterbahn aus metallisch leitenden Elektroden mit zwischengeschalteten Gasstrecken, d. h. den Übergangserscheinungen von jenen in Luft interessieren neben den obenerwähnten Gasentladungen bei vermindertem Gasdruck in erster Linie die Verhältnisse bei Luft von Atmosphärendruck. Es fallen hierunter nicht nur alle elektrischen Ausgleichvorgänge der Funkenentladung bis zum ständigen Lichtbogen, sondern auch die

Leitung durch die Anhäufung vieler fester Leiterstrecken mit Lockerkontakten wie Mikrophone und Kohärer.

Die Entstehung der Entladungsfunken, der Zusammenhang zwischen Spannung an den Elektrodenenden und Schlagweite hängt auf das engste mit der oben erwähnten Frage der „freien Jonen" zusammen. Die Verschiedenheit in den Schlagweitewerten und -formeln (vgl. **128**) von Paschen (1889), Freyberg (1889) u. a., ferner der von Jaumann (1888) konstatierte Einfluss der Schnelligkeit der Spannungsänderung $\frac{de}{dt}$, sowie manche andere Eigentümlichkeiten dieser Funkenentladungen, endlich die zahlreichen photoelektrischen Beeinflussungen jenes Zusammenhanges würden als einheitliche Erklärung die dadurch bedingten, oder auch von vornherein vorhandenen (vgl. **37**) Unterschiede im Jonisierungszustande der Luftstrecke zulassen; namentlich würden alle, die Entladung meist erleichternden photoelektrischen Einflüsse, wie sie zuerst in den Jahren 1887—1889 von zahlreichen Forschern, wie Hertz, E. Wiedemann nnd Ebert, Arrhenius, Hallwachs, Elster und Geitel, Righi, Branly, Stoletow u. a. beobachtet wurden, auf die Jonisierung der Zwischenstrecke durch die Einwirkung der Strahlung, meist im Sinne der Vermehrung der „freien Jonen", zurückführbar sein, ebenso wie die Zerstreuung und Erzeugung von Ladungen durch Lichtstrahlungen.

Etwas schwieriger scheint der Fall beim stehenden Lichtbogen zu liegen. Die alte Streitfrage kann auch heute noch nicht als endgültig gelöst angesehen werden, ob der Lichtbogen eine Gegen-EMK besitze, wie Edlund (1867), von Lang (1885) und Arons (1887) durch Versuche nachgewiesen zu haben meinen, oder keine solche, sondern nur Übergangswiderstände von entsprechender Grösse, wie Uppenborn (1887), Stenger (1892) u. a. nachgewiesen haben wollen. (Weiteres siehe H. I, 2, sowie Bd. VIII).

Bedenkt man, dass die Gasentladung bei weniger oder mehr Druck bis hinauf zum Atmosphärendruck eigentlich nur eine quantitative und keine qualitative Änderung der Verhältnisse darstellt, ferner dass die Funkenentladung in den Ausgleich des stehenden Lichtbogens kontinuierlich übergeht, wenn nur für hinreichende Zufuhr von elektrischer Energie gesorgt, d. h. eine für den eingeleiteten Ausgleich hinreichende Spannung an den Enden der Gasstrecke aufrecht erhalten wird, so ist auch hier eine Aufklärung zu erwarten, wenn das Lichtbogenphänomen und seine Untersuchung vom Standpunkte der „freien Jonen" aus in Angriff genommen würde, was bisher nach Wissen des Verfassers noch nicht geschehen ist. Hierfür sprechen auch die übrigen Beobachtungen am Flammenbogen, wie der grosse Einfluss des Salzgehaltes der Kohlen nach den Untersuchungen von Casselmann (1844) und Hittorf (1874), des Elektrodenmateriales nach Edlund (1867) und von Lang (1887), ferner der Atmosphäre des Bogens nach Villari (1889); hierfür sprechen die Wirkung von Docht- bezw. Homogenkohlen beim Wechselstromlichtbogen, sowie neuerdings die Beobachtungen an den Dauerbrandbogenlampen, vor allem aber auch die vorhandene Beeinflussung des Bogens durch magnetische Kräfte entsprechend dem Verhalten der Kathodenströmung, eine beim Lichtbogen neuerdings auch technisch verwertete Ablenkbarkeit. Ob man es bei dem Lichtbogen mit einem der Kathodenstrahlung im *wesentlichen* völlig analogen Ausgleichvorgang zu thun hat, der nur in quantitativer Hinsicht stark modifiziert ist, sodass z. B. der glühende positive Krater, der durch das Bombardement der Kathodenpartikel-

chen stark erhitzten Antikathode — hier zugleich Anode — entspricht, müssen erst weitere Untersuchungen lehren.

Aufklärung nach dieser Richtung ist vermutlich aus dem Studium der neuesten Erscheinungen auf dem Gebiete der Bogenlampentechnik, nämlich dem sogenannten BREMER-Licht (1900) und der Elektrolytbogenlampe nach RASCH (1901) zu erwarten. Im ersten Falle wird durch Zusatz von 20 bis 50 % nichtleitender Metallsalze, z. B. calcium-, silicium- oder magnesiumhaltiger Verbindungen zur Kohle eine sehr erhebliche Steigerung der Ökonomie bis etwa zum dreifachen Wert gegenüber den Bogenlampen mit gewöhnlichen Kohlen erzielt; im zweiten Falle ist man noch einen Schritt weitergegangen und hat die Kohlen völlig durch nahezu unverbrennliche Elektroden, d. h. die uns bekannten hitzebeständigsten Oxyde von Magnesia, Kalk, Thoroxyd, Zirconoxyd u. s. w. ersetzt, die man durch einen vorübergehend eingeschalteten Hülfslichtbogen durch Erhitzung zum Leiten bringt. Diese Oxyde bilden insofern eine sehr interessante Klasse von elektrischen Leitern, als sie bei niederen Temperaturen praktisch Nichtleiter sind und nur bei sehr hohen Temperaturen und alsdann sehr gut leiten. Diese Erscheinung wurde zunächst von NERNST weiter verfolgt und (1898) zur Konstruktion der NERNST-Glühlampe verwendet. Physikalisch bilden diese Oxyde, deren elektrisches Verhalten zuerst von SOHLMANN (1900) näher untersucht wurde, ein offenbar sehr interessantes Zwischengebiet der verschiedenen elektrischen Leitungsfähigkeiten, das für die Lösung der elektrischen Leitungsfrage noch weitere Aufklärung verspricht, da hier möglicherweise alle drei Fälle: des Isolators (bei tieferen Temperaturen), der elektrolytischen und der metallischen Leitung zusammenstossen. Denn wenn auch die kleinen Verschiedenheiten des Verhaltens bei Gleich- und Wechselstrom für eine elektrolytische Leitung spricht, so lassen die Beobachtungen an den neuen NERNST-Lampen es zum mindesten zweifelhaft erscheinen, ob nur elektrolytische Leitung vorliegt, oder auch metallische, oder ob die letztere in einigen Fällen gar überwiegt.

Zu dem klärungsbedürftigen Grenzgebiet zwischen elektrolytischer und metallischer Leitung zählen auch die Beobachtungen über die geringe Leitungsfähigkeit von festen Salzen und von Krystallen.

Entgegen der von FARADAY gemachten Annahme, dass zur elektrolytischen Leitung der flüssige Zustand der Substanzen notwendig sei und die Leitungsfähigkeit im Moment der Erstarrung aufhöre, wurden von F. BRAUN (1875), BEETZ (1875) bei verschiedenen festen Salzen Leitungsfähigkeit weit unterhalb des Erstarrungspunktes bis herab zur gewöhnlichen Temperatur nachgewiesen und von W. KOHLRAUSCH (1882), BOUTY und POINCARÉ (1889), GRÄTZ (1886—1890) u. a. genauer messend verfolgt; desgleichen für verschiedene Glassorten durch BUFF (1854), BEETZ (1878), welcher starke Zunahme der Leitfähigkeit mit wachsender Temperatur fand, wobei die Annahme von WARBURG (1884) beachtenswert ist, dass eine an der Anode sich bildende, schlecht leitende Schicht aus SiO_2 die Erscheinung beeinflusse. Das Verhalten der Krystalle hinsichtlich elektrischer Leitfähigkeit nähert sich insofern den Dielektricis mit ihren Spuren von Leitvermögen, als nach den Untersuchungen von GAUGAIN (1860), WÜLLNER (1877) die Leitungsfähigkeit mit der Zeit, d. h. hindurchgeflossener Elektrizitätsmenge $Q = \int i dt$ ständig abnimmt, eine Erscheinung die von einigen wie BRAUN (1887) als

dielektrische Rückstandsbildung, von anderen wie Warburg und Tegetmayer (1887) und Curie (1889) als allmählich zunehmende Polarisation, in einigen Fällen auch als Übergangswiderstand durch Bildung einer schlechtleitenden Schicht (vgl. oben) angesprochen wurde. Eine Vereinigung der beiden ersten Annahmen bei entsprechender Auffassung der Rückstandserscheinung erscheint dem Verfasser keineswegs ausgeschlossen (vgl. hierzu **125**).

Einen interessanten Fall von Wellenstromerscheinungen an dem Gleichstromlichtbogen, der allerdings bereits zu den weiter unten erwähnten Wechselbeziehungen der elektrischen Ausgleichvorgänge mit anderen Energieformen hinüberleitet, stellt die sogenannte sprechende Bogenlampe dar in der von Simon (1898 und 1900) angegebenen Übereinanderlagerung des ursprünglichen Gleichstromniveaus des Bogens mit dem Wechselstrom eines Telephons. Nach der gegenwärtigen Annahme wäre die Temperaturänderung des Bogens entsprechend der Wellenstromstärke als die erste Folge, die entsprechend der Temperaturänderung erfolgende Volumenänderung der Gassäule des Bogens als die weitere Folge und als Grund für die stattfindende Wiederumsetzung der Wellenstromstärke in Schallwellen anzusehen. Die anschliessenden Untersuchungen von Duddell (1901) über starke Ladeströme in parallelgeschalteten Kondensatoren bestätigten die obige Annahme, dass auch der Lichtbogen unter geeigneten Umständen als Wellenstromerreger zweiter Ordnung auftritt.

Bei den Übergangserscheinungen wäre zum Schluss noch die Abhängigkeit des elektrischen Leitungswiderstandes der Lockerkontakte von geringen mechanischen Erschütterungen einerseits, von elektromagnetischen Wellen bezw. elektrischen Ausgleichstössen andererseits zu erwähnen, Erscheinungen, die in dieser Periode in Gestalt des Mikrophons (Berliner 1877, Lüdtge 1878, Hughes 1878) und des Fritters oder Kohärers (Branly 1891) von praktischer Wichtigkeit geworden sind. (Weiteres vgl. Bd. XII.)

Eine tieferliegende Erklärung steht bisher noch aus, welche die zahlreich empirisch beobachteten Thatsachen auf diesem Gebiete in engere Verbindung miteinander bringt, indem sie dieselbe auf eine gemeinsame Basis zurückführt; hierzu gehören auch die für die Starkstromtechnik praktisch wichtigen Übergangswiderstände von Schleifkontakten abhängig vom Druck und dergleichen. Allerdings ist die Schwierigkeit einer Erklärung bei dieser Erscheinungskette, welche von der Funkenentladung bezw. dem Lichtbogen über die Lockerkontakte zu den Druckkontakten und schliesslich den elektrischen Leitungswiderständen kontinuierlicher Leiter führt, auch nicht gering, da sie in das Gebiet der Molekularphysik mit den schwierigen Kapiteln von Adhäsion und Kohäsion hinüberspielt.

Über die verschiedenen Hypothesen und den heutigen Stand der Kohärerfrage siehe Ph. Z. II, 374 u. ff., woselbst auch ein umfangreiches Litteraturverzeichnis über alle einschlägigen Arbeiten sich findet.

Die Erscheinungen der Veränderlichkeit von Widerständen durch elektromagnetische Wellen erlangen für die Funkentelegraphie (ohne Draht) praktisch immer grössere Bedeutung und sind in den letzten Jahren noch durch zwei weitere Fälle bereichert worden, die in einem gewissen Gegensatz zum Verhalten des Kohärers stehen, indem hier eine Widerstandsvergrösserung durch Bestrahlung mit jenen Wellen erfolgt. Es ist dies der Ohmsche Widerstand einmal von feinen Metallspalten, welche feucht gehalten werden, von Neugeschwender (1899) beobachtet, ein zweites Mal von dünnen trockenen Silber-

spiegeln, welche mit feinen Rissen versehen sind, nach dem Entdecker ihres praktisch wertvollen Verhaltens SCHÄFERsche Platten genannt, oder nach ihrer Eigenschaft bei Bestrahlung ihren Widerstand zu vergrössern auch Antikohärer. Während es bei jenen feuchten Platten sich nachgewiesenermassen um einen elektrolytischen Vorgang handelt, der bei Bestrahlung durch Veränderung der Flüssigkeit erschwert wird, hat man es nach Untersuchungen von MARX (1901) beim Antikohärer mit metallischer Leitung über feine Metallbrücken zu thun, deren Widerstand sich bei Bestrahlung ändert und zwar vergrössert, also eine Erscheinung, die eine gewisse Verwandtschaft zeigt mit früheren, unter anderen von LÜDTKE und CAREY LEA gemachten Beobachtungen an frisch niedergeschlagenen dünnen Silberhäuten, deren physikalische Eigenschaften, namentlich die elektrische Leitfähigkeit, sich durch einmalige Erwärmung oder längere Belichtung stark beeinflusst zeigten.

Vermutlich wird auch die Erscheinung, welche die Grundlage der nach BELL und TAINTER (1880) sogenannten Photophonie bildet, nach weiterer Aufklärung bei den Lockerkontakten einzureihen sein, nämlich das Verhalten des krystallinischen Selens, seine sehr geringe Leitfähigkeit bei Belichtung sehr zu verbessern, eine Eigenschaft, die von MAY und WILLONGHBY SMITH (1873) entdeckt und namentlich von WERNER SIEMENS (1875—1877, siehe seine Wiss. Arb. I, 260 und 270—311) näher untersucht und zur Konstruktion eines Selenphotometers benutzt wurde. Abgesehen von weiteren Verbesserungen der Präparate, so namentlich der für die Zeichenübermittelung benutzten Selenzelle nach TAINTER (1880), haben auch hier die verschiedensten, sich zum Teil widersprechenden Vermutungen noch zu keiner weiteren Klärung des eigentümlichen Verhaltens der Selenpräparate geführt, um so weniger, als die einzelnen Präparate ganz wesentliche Verschiedenheiten aufweisen, insofern bei einzelnen nur Änderungen des Leitungswiderstandes, bei anderen EMKK bei Belichtung auftreten (vgl. W. SIEMENS a. a. O. Seite 311 über die Präparate von FRITTS). Ob hier, wie SIEMENS anzunehmen schien, die Brücke zwischen metallischer und elektrolytischer Leitung zu suchen ist, oder ob der Jonisierungszustand der Umgebung des Selenpräparates durch die Belichtung verändert wird, wie man auf Grund der neueren Beobachtungen und Auffassungen (vgl. **37**) vielleicht annehmen könnte, bedarf noch weiterer Klärung.

39. Wirkungen des elektrischen Stromes.

Zu den Folgeerscheinungen der elektrischen Ausgleichvorgänge übergehend, welche im Vorhergehenden bei der sprechenden Bogenlampe, Änderung des Leitungswiderstandes von Wismut im magnetischen Felde, bei der elektrolytischen Zersetzung und anderen Gelegenheiten schon wiederholt gestreift wurden, sei mit Unterscheidung von Wirkungen in der Strombahn und solchen im Felde zunächst kurz auf die zwar schon früher hin und wieder beobachteten, aber erst in dieser Periode näher untersuchten Erscheinungen der elektrischen Endosmose, sowie der Fortführung suspendierter Teilchen hingewiesen. Die elektrische Endosmose, d. h. die durch den Strom bewirkte Fortführung von Flüssigkeiten durch Diaphragmen hindurch in Verbindung mit Erzeugung eines osmotischen Strömungsdruckes wurde zuerst von G. WIEDEMANN (1852), hierauf von QUINCKE (1861) in ihren Gesetzen genauer untersucht und eine allgemeiner angenommene Theorie von HELMHOLTZ (1879) mit Zuhülfenahme der Auffassung der Doppelschichten gegeben, welche gleichzeitig die von QUINCKE (1859) entdeckte Umkehrerscheinung der sogenannten elektrischen Strömungsströme (vgl. **88**) miterklärte.

Die Fortführung von in der Flüssigkeit suspendierten Teilchen bei Stromdurchgang, richtiger vielleicht im elektrischen Felde, ist im Anschluss an ältere Beobachtungen von Reuss und von Faraday auch näher von Quincke (1861) untersucht worden, ohne aber bisher als auf einfachere Erscheinungen zurückgeführt gelten zu können. Aus der Relativität der Bewegung zu schliessen, d. h. dem Wechsel der Fortführungsrichtung je nach Wahl der Flüssigkeit, Wasser oder Terpentinöl, sowie des suspendierten Materials, hat man es hierbei vermutlich mit einer durch das elektrische Feld bewirkten Umsetzung von elektrischer in mechanische Energie zu thun; diese wäre hinsichtlich Richtung der Ausgleicherscheinung ähnlich aufzufassen wie die Bewegungserscheinungen im magnetischen Felde, je nachdem das Verhältnis der magnetischen Permeabilitäten von Medium und suspendiertem Körper kleiner oder grösser als die Einheit ist. Auch mit den Gasentladungsvorgängen scheint eine gewisse Analogie zu bestehen, insofern die hier mit dem Auge sichtbaren Massenteilchen sich ähnlich verhalten wie jene materiellen Partikelchen von ausserordentlich kleiner Grössenordnung.

Von den zahlreichen Erscheinungen im magnetischen Felde von stromdurchflossenen Leitern gehört ein grosser Teil in das Gebiet des Magnetismus, welches gesondert behandelt werden soll (siehe H. I, 2), weshalb hier nur auf eine Reihe von Phänomenen hingewiesen sei, welche nach ihren Entdeckern Elihu Thomson, Hall und Zeemann benannt zu werden pflegen.

Die Untersuchungen über die ponderomotorischen Wirkungen zwischen stromdurchflossenen Leitern waren zwar sogleich von Ampère zu einem gewissen Abschluss gebracht worden (vgl. **23**), doch brachte die Anwendung des periodischen Wechselstromes eine Erscheinungsgruppe zu unserer Kenntnis, die in ihren Differential- oder auch Momentanwerten zwar völlig durch die Formulierungen von Ampère gedeckt ist, aber infolge des Hineinspielens der Selbstinduktion eine Integralwirkung liefert, welche als eigenartige Kombination von Wechselinduktion und Selbstinduktion eine unerwartete Bereicherung auf diesem Gebiete brachte. Es sind dies die elektromagnetischen Abstossungserscheinungen, welche zwischen dem primären von Wechselstrom durchflossenen und daher ein Wechselfeld erzeugenden Strom- bezw. Feldträger und den sekundär kurzgeschlossenen Stromkreisen auftreten, wenn bei diesen letzteren der Wert des Selbstinduktionskoeffizienten gegenüber dem Ohmschen Widerstand hinreichend gross ist, oder mit anderen Worten eine merkliche Phasenverzögerung der Wechselstromstärke im Sekundärkreise gegenüber ihrer Ursache, das ist der durch Wechselinduktion im Sekundärkreise induzierten Wechselspannung vorhanden ist. Diese Erscheinungen wurden zuerst 1884 von Elihu Thomson nach einer gelegentlichen Beobachtung in ihren Bedingungen näher untersucht und erklärt (weiteres siehe H. I, 2).

Die Theorie der Elektrizität betrachtete den Nachweis, dass durch das magnetische Feld nicht nur die Stromfäden mitsamt dem Stromträger, wie bei allen bisher beobachteten ponderomotorischen Wirkungen, sondern auch die Stromfäden im feststehenden Stromträger eine Ablenkung bezw. Verzerrung erfahren können, schon seit längerer Zeit als sehr wichtig. Die zahlreichen Bemühungen nach dieser Richtung blieben aber erfolglos, bis es (1879) Hall gelang, dieses Phänomen in sehr dünnen Metallfolien nachzuweisen und in den folgenden Jahren (bis 1888) auch die Gesetze für diese Erscheinungen aufzustellen und die hierfür in Betracht kommenden Materialkoeffizienten R, sogenannte Rotationskoeffizienten der betreffenden Folienmetalle, zu bestimmen.

Von seinen Nachfolgern, namentlich RIGHI (1883), VON ETTINGSHAUSEN und NERNST (1886 u. ff), BOLTZMANN (1887) wurden seine Untersuchungen nicht nur bestätigt und vervollständigt, sondern auch eine grössere Zahl verwandter Phänomene oder sogenannter Effekte aufgefunden, so durch DRUDE und NERNST (1890) der longitudinale HALL-Effekt beim Verlauf der magnetischen Kraftlinien in Richtung der Stromstärke und Metallfolie, so benannt im Gegensatz zu dem gewöhnlichen oder transversalen HALL-Effekt mit den magnetischen Kraftlinien senkrecht zur Folie und zur Stromstärke. Diese bei Wismut am stärksten auftretende Erscheinung ist auch mit seinem eigentümlichen Verhalten der Widerstandsvergrösserung im magnetischen Felde in Verbindung gebracht und letztere nur als scheinbar, d. h. in Wirklichkeit als EMGK infolge Verzerrung oder Verdrehung der Stromfäden aufgefasst worden.

Wird der elektrische Strom in der Metallfolie durch einen Wärmestrom ersetzt, so tritt im magnetischen Felde nach ETTINGSHAUSEN und NERNST (1886) gleichfalls ein elektrischer Transversalstrom auf, sowie nach RIGHI (1887) eine Ablenkung der Isothermen (thermischer Transversaleffekt). Diesem als thermomagnetischer Transversaleffekt bezeichneten Phänomen fehlt auch entsprechend dem obigen das Seitenstück des thermomagnetischen Longitudinaleffektes nicht. Endlich hat auch ETTINGSHAUSEN (1887) die als galvanomagnetischer Transversal- und Longitudinaleffekt bezeichnete Umkehrerscheinung, d. h. im magnetischen Felde das Auftreten einer Temperaturdifferenz beziehungsweise eines Wärmestromes senkrecht zu einem elektrischen Strome in der Metallfolie aufgefunden. Nimmt man hierzu noch die Erscheinungen, dass nach Untersuchungen von GROSS (1886) und GRIMALDI (1889) verschiedene Metalle, namentlich Eisen und Wismut, im magnetischen Felde sowohl als Elektroden in Primärelementen elektromotorisch eine andere Stellung einnehmen, als auch thermoelektrisch anderes Verhalten zeigen, so hat man eine Sammlung von Erscheinungen, die an weiterer Aufklärungsbedürftigkeit nichts zu wünschen übrig lassen, aber gleichfalls (vgl. **95**, **96**) auf einen engeren Zusammenhang von thermischen und elektrischen Eigenschaften hinzudeuten scheinen und gleichzeitig eine gewisse Aussicht gewähren, dem bis jetzt noch recht mystischen Wesen der elektrischen Leitung in Metallen beizukommen. Glaubte doch bereits ETTINGSHAUSEN (1880) aus dem HALL-Phänomen auf die Richtung und Geschwindigkeit, mit welcher die Elektrizität in Leitern strömt, einen Schluss ziehen und dieselben auf Grund seiner Messungen zu wenigen Millimetern in der Sekunde und zwar von der Kathode (—) zur Anode (+), d. h. umgekehrt, wie die jetzt gewöhnlich angenommene Strömungsrichtung von + nach — angeben zu können. Es ist dies ein mit Rücksicht auf die Forschung der Kathodenströmung sehr interessantes Resultat, da dieselbe Ausgleichgeschwindigkeiten von sehr verschiedener Grössenordnung, je nach der Gasdichte geliefert hat, welche bei sehr verdünntem Medium nahezu den Anschluss an die Lichtgeschwindigkeit erreicht haben (vgl. **79**).

Im Sinne des Zusammenschlusses der einzelnen Erscheinungsgebiete wirkte auch BOLTZMANNS Nachweis (1887), dass die Gasentladungen (Kathodenströmung) das HALL-Phänomen in analogem, ja noch viel stärkerem Masse zeigen wie die Strömung in Metallfolien, insofern sekundäre Transversalelektroden, in einer cylindrischen Entladungsröhre angebracht, bei Einwirkung des magnetischen Feldes Spannungsdifferenzen aufweisen, und der Ausgleichwiderstand zwischen den primären Elektroden steigt, nach BOLTZMANN

bis zum zehnfachen Betrage des Wertes, welcher ausserhalb des magnetischen Feldes vorhanden ist. Nahe verwandt mit dem HALL-Phänomen ist auch die Ablenkung des stehenden Lichtbogens durch den Magnet, sowie das Seitwärtsblasen der Lichthülle von Funkenentladungen durch das Magnetfeld, während die hellleuchtende Funkenbahn selbst nicht beeinflusst wird.

Das letzte der drei oben erwähnten Phänomene, von ZEEMANN im Jahre 1896 entdeckt, und nach Ansicht von DRUDE mit dem HALLschen Phänomen verwandt, reicht bereits ganz ins optische Gebiet hinüber, ist aber als starke Stütze der elektromagnetischen Lichttheorie (vgl. H. I, 3, § 49) nebst einigen anderen magnetooptischen Erscheinungen hier wenigstens zu erwähnen.

Noch gegen Schluss der vorigen Periode (vgl. **26**) war es nach langen Bemühungen FARADAY (1845) endlich gelungen die experimentelle Brücke zwischen den optischen und magnetischen Erscheinungen zu schlagen und in der Drehung der Polarisationsebene im magnetischen Felde die Grundlage für die theoretisch so ausserordentlich wichtigen magnetooptischen Beziehungen aufzufinden. Unter den zahlreichen in dieser Periode an dem Ausbau dieses Gebietes arbeitenden Forschern (vgl. die Litteratur in Wk. IIIb, 275 u. ff.) förderte ihn namentlich VERDET (1854 u. ff.) durch Aufstellung von Gesetzen und Ermittelung der materiellen Konstanten für die verschiedenen Wellenlängen (VERDETsche Konstante als Betrag der Drehung der Polarisationsebene pro Einheit des magnetischen Gefälles längs des Lichtstrahlweges). Diese Drehung wurde nicht nur in Flüssigkeiten, sondern bei allen Stoffen nachgewiesen und somit auch deren Magnetisierbarkeit; in Gasen und Dämpfen zuerst von KUNDT und RÖNTGEN (1879), später in äusserst dünnen Metallhäuten und zwar zuerst bei Eisen durch KUNDT (1884). Die ausserordentliche starke Drehung in letzteren, nämlich bei magnetischer Sättigung um 360° auf 0·02 mm lieferte auch die Erklärung für das inzwischen (1876) von KERR beobachtete Phänomen, dass das an stark magnetisierten Metallflächen reflektierte Licht gleichfalls eine Drehung seiner Polarisationsebene erfuhr, deren Gesetzmässigkeit abhängig von Material, Wellenlänge, Einfallswinkel und dergleichen von zahlreichen Forschern festgelegt und deren Ursache nach den Ausführungen von DRUDE (1892) mit ziemlicher Gewissheit in einem, wenn auch geringen Eindringen der Lichtstrahlen in den magnetischen Metallspiegel vor ihrer Reflexion zu suchen ist.

ZEEMANN endlich gelang es im Jahre (1896) die aus MAXWELLs elektromagnetischer Lichttheorie gezogene Folgerung einer Verbreiterung der Spektrallinien, beziehungsweise Auflösung derselben in mehrere durch die Einwirkung des magnetischen Feldes experimentell nachzuweisen und so einen wichtigen Schlussstein einzufügen. (Weiteres siehe H. I, 3, § 49 und § 62.)

40. Elektrische Messprinzipien und Messinstrumente.

Die Benutzung der Ausgleichwirkungen zu Messzwecken wird in dieser Periode auch nur im Überblick zu behandeln sein, da die gegenwärtig benutzten Messmethoden und Messinstrumente eine gesonderte Behandlung in Bd. II erfahren. Scheiden wir zunächst in Messinstrumente und Messmethoden und bezeichnen mit letzterem Worte die mehr oder weniger komplizierten Messschaltungen zur Ermittelung einzelner elektrischer Grössen oder des Zusammenhanges von solchen, so erscheint es naturgemäss die Messinstrumente, sowie die ihren Angaben zu Grunde liegenden Messprinzipien zuerst zu behandeln, da die Messmethoden das Kompliziertere darstellen und die Messinstrumente als den einen, wenn auch meist wichtigsten Teil enthalten. Auf alle Fälle muss der Zusammenhang zwischen Angabe des Messinstrumentes und

der zunächst von ihm angegebenen elektrischen Ausgleichgrösse bezw. -grössen kritisch geklärt sein, ehe es eindeutig in einer Messschaltung verwendbar ist.

Werfen wir zunächst einen Blick auf die allgemeine Entwickelung der Messinstrumente für elektrische Grössen, so ist auf diesem Gebiet namentlich gegen Ende der Periode ein ausserordentlicher Umschwung und eine grosse Bereicherung unverkennbar, welche in erster Linie durch die Elektrotechnik veranlasst wurde. Das Instrumentarium der physikalischen Laboratorien war, soweit elektrische Messinstrumente in Frage kamen, in den ersten Decennien dieser Periode nicht erheblich über den Stand am Schluss der letzten Periode hinausgekommen. Einige Verfeinerungen und vielleicht Empfindlichkeitssteigerungen abgerechnet konnte es, und kann es vielfach heute noch, ein stark konservatives Gepräge nicht verleugnen, wenn auch die durch die Elektrotechnik bedingten Fortschritte des Instrumentenbaues sich allmählich auch hier bemerkbar machen. Der grosse Umschwung in Gestalt des Überganges zu in sich geschützten Messinstrumenten war in erster Linie durch die Ausbreitung der Starkstromanlagen und die dadurch veranlassten Störungen des Erdfeldes bedingt, die starke Bereicherung durch die Entwickelung und die Anforderungen der Wechselstromtechnik.

Zur Erleichterung der Übersicht sowie zur Einordnung der überaus zahlreichen Instrumentformen sei folgende Gliederung aller Messinstrumente nach ihren Messprinzipien für die folgende Betrachtung benutzt. Die erste Hauptteilung scheidet alle Messinstrumente in elektrostatische und stromverbrauchende Messinstrumente. Diese zwar nach ihrer Bedeutung sehr ungleichen Teile bieten insofern die prinzipiell grösste Verschiedenheit, als jene keine geschlossene Leiterbahn zwischen ihren Zuleitungsenden besitzen, während diese zwischen ihren Klemmen stets als Ausgleichwiderstand eine geschlossene Leiterbahn darbieten, woraus weiterhin folgt, dass jene unmittelbar stets Spannungen, diese unmittelbar stets eine Stromstärke zur Anzeige bringen. Dass diese in erster Linie angezeigte Grösse unter Hinzuziehung der Gesetze des elektrischen Ausgleiches sogleich eine Aichung des Messinstrumentes nach anderen elektrischen Grössen zulässt, ist eine Sache für sich, die von dem unmittelbaren Messprinzip unabhängig ist und noch eine oder mehrere stillschweigende Voraussetzungen enthält, z. B. über die Gültigkeit bezw. Konstanz des angenommenen Ausgleichwiderstandes. Als Beispiel sei nur auf die stromverbrauchenden Voltmeter hingewiesen, die in erster Linie Schwachstromamperemeter darstellen.

Um die Entwickelung der elektrostatischen Messinstrumente in dieser Periode sogleich zu erledigen, so verdanken wir die Ausbildung dieser unmittelbaren elektrischen Spannungsmesser, wie bereits (**29**) angegeben, überwiegend W. Thomson, der sie in theoretischer wie in konstruktiver Hinsicht (1867) am meisten vervollkommnete. Dies gilt sowohl von dem absoluten Scheibenelektrometer mit Schutzring in Form einer Spannungswage, als von den Quadrantenelektrometern. In späterer Zeit traten dann noch die für viele Wechselstrommessungen besonders wichtigen direkt zeigenden Spannungszeiger hinzu, besonders die vielzelligen Formen.

Für die Messung kleiner Gleichspannungen, namentlich bei elektrochemischen Untersuchungen, brachte (1873 u. ff.) das Kapillarelektrometer von Lippmann ein neues Prinzip, welches auf der Veränderung der Kapillarkonstante zwischen Quecksilber und Schwefelsäure abhängig von der Spannung beruht (vgl. hierzu Fig. 32 in **85**).

Auch die Elektroskope mit dem ältesten und primitivsten Messprinzip, erfuhren noch einige Verfeinerungen, so z. B. noch am Schluss der Periode (1899) durch Elster und Geitel in ihrem Apparat zur Messung der Elektrizitätszerstreuung in der Luft.

Die ponderomotorischen Antriebe im Sinne der Kapazitätsvergrösserung eines beweglichen Systems, welche allen elektrostatischen Messinstrumenten zu Grunde liegen, wurden auch noch in anderer Form zur Messung von hohen Spannungen verwertet, nämlich in der Drehung von ungleichdimensionierten Körpern wie Cylindern, oder Ellipsoiden von grösserer Dielektrizitätskonstante k als die Umgebung (Luft) in einem möglichst homogenen elektrischen Feld, welches durch die zu messende Spannung zwischen zwei Metallplatten hervorgerufen wird, die nach Art eines Luftkondensators sich gegenüberstehen. Dieses Bestreben von Körpern höherer Permeabilität nach Einstellung längs der Kraftlinien, d. h. mit der Hauptausdehnung senkrecht zu den Platten (grösste Kapazität), war magnetisch längst bekannt, wurde aber auf das elektrische Gebiet messtechnisch zuerst (1891) von H. Hertz (vgl. **35**, sowie H. I, 2) bei Untersuchung der elektrischen Schwingungen verwendet, wobei als Drehkörper ein Hohlcylinderchen aus Goldpapier diente. Später wurde von Grätz und Fomm ein Messapparat mit einem dielektrischen Vollcylinder wie Hartgummi oder Schelllack vorgeschlagen, und endlich (1898) ein Hochspannungsinstrument, gleichfalls mit Spiegelablesung wie die vorgenannten, von Ebert und Hofmann mit einem Ellipsoid aus Aluminium ausgebildet, das somit wieder auf das ponderomotorisch wirksamere Metall zurückgriff, da für letzteres praktisch $k = \infty$ (siehe hierzu **115**).

Die umfangreiche zweite Hauptklasse der Messinstrumente, deren Angabe auf irgend einer Wirkung der Stromstärke beruht, welche die zusammenhängende Leiterbahn zwischen je zwei zusammengehörigen Instrumentenklemmen durchfliesst, wird am besten weiterhin in zwei grosse Unterklassen zerlegt: Instrumente mit Stromstärkewirkungen *in der Leiterbahn* und *ausserhalb* derselben, d. h. mit Heranziehung der *Feldwirkungen* als Mass für die Stromstärke.

Die erste Unterklasse, welche die Stromwirkungen in der Leiterbahn benutzt, zerfällt weiterhin in elektro*chemische* Strommesser (Voltameter) mit Heranziehung der elektrolytischen Zersetzungsprodukte als Integralmass der *einseitig in bestimmter Richtung geflossenen* Elektrizitätsmenge und in elektro*thermische* Strommesser.

Die Entwickelung der Voltameter ist nur in Richtung der Metallvoltameter, namentlich des von Poggendorf zuerst angegebenen Silbervoltameters, für Normalaichungen von praktischer Bedeutung geworden (weiteres siehe Bd. II). Die sogenannten Wasservoltameter, sowohl in der zuletzt (1885) von F. Kohlrausch ausgebildeten Form des Volumen-Knallgasvoltameters, als in der zuerst (1854) von Bunsen benutzten, von Ledingham (1884) weiter ausgebildeten Form des Gewichtsvoltameters haben an praktischer Bedeutung als *Aichvorrichtungen* gegenüber den Metallvoltametern immer mehr verloren wegen der zahlreichen Fehlerquellen und sind als Messinstrumente völlig bedeutungslos geworden, weil die *indirekte* Ermittelung der Stromstärke als Mittelwert des einen Faktors der vom Voltameter in erster Linie bestimmten Elektrizitäts*menge* für die meisten Zwecke durchaus unbefriedigend und den neueren Messinstrumenten unterlegen ist.

Die bei ursprünglich symmetrischem Wechselstrom beobachtete schwache Wirkung der Voltameter beruht auf Ungleichartigkeit der Elektroden und eine dadurch bedingte schwache Ventilwirkung, d. h. Erzeugung eines Wellenstromes mit sehr kleinem Gleichstromniveau (vgl. 38 und H. I, 2).

Demselben Einwand wie die Voltameter als Messinstrumente (nicht Aichvorrichtungen) begegnen die älteren elektrothermischen Strommesser, welche eigentlich nur elektrisch umgestaltete Kalorimeter sind, wenn dieselben auch wegen ihrer Gleichwertigkeit für Gleich- und Wechselstrom in der ersten Zeit der Entwickelung des Wechselstromes vorübergehend als Notbehelf eine gewisse Rolle gespielt haben mögen und für manche physikalische Untersuchungen zur Ermittelung einer wirklich in Wärme umgesetzten Energiemenge in speziellen Ausführungen wohl noch spielen. Zur Messung der Stromintensität sind sie aber wohl gänzlich von den sogenannten Hitzdrahtinstrumenten mit empirischer Aichung verdrängt worden, bei denen nicht die entwickelte Wärme selbst, sondern erst eine weitere Wirkung derselben in Gestalt der Verlängerung eines gespannten Fadens als messtechnischer Parameter dient. Nach einer ersten, schon im Jahre 1848 von Hankel gegebenen Anregung hat H. Hertz (1883) als erster ein Spiegelinstrument zum Nachweis von Wechselströmen auf dieses Prinzip gegründet. Als direkt zeigendes Instrument erfuhr es seine erste Ausbildung (1886) durch Cardew der in der langdrähtigen, namentlich für Spannungsmessung bestimmten Form, die direkte Verlängerung zur Messung brachte. Die handlichere kurzdrähtige und durch Abzweigung auch der Messung höherer Stromstärken leicht anzupassende Form wurde wenige Jahre später von Ingenieuren der Firma Hartmann & Braun ausgebildet. Wir begegnen hier zum ersten Male dem Falle, der nicht nur auf dem Gebiete des Instrumentenbaues, sondern auch bei den neueren Erfindungen auf allen Gebieten der Elektrotechnik infolge der eigenartigen Entwickelung derselben sehr häufig, ja beinahe die Regel ist, dass wichtige Fortschritte durch gleichsam anonyme Kräfte erfolgen, insofern die Persönlichkeit des Erfinders unter dem Sammelnamen der Grossfirma, welcher er angehört, mehr oder weniger verschwindet. Der in diesem Falle heilsame Einfluss der Konkurrenz hat neben den rasch wachsenden Anforderungen der Technik in der Entwickelung der elektrischen Messinstrumente ebenso wie auf den meisten anderen Gebieten der Elektrotechnik ein rasches Tempo in der Vervollkommnung und Erfindung veranlasst, das zum grossen Teil dem Wirken jener anonymen Kräfte zu verdanken ist.

Der zweiten und wichtigsten Unterklasse von Strommessern liegt eine der zahlreichen magnetischen Feldwirkungen als Messprinzip zu Grunde; sie hat auch die reichhaltigste Entwickelung in dieser Periode erfahren. Zwar sind durchaus nicht alle Feldwirkungen für Messzwecke bis jetzt bedeutungsvoll geworden, sodass eine ganze Reihe von Messmöglichkeiten als zu umständlich, beziehungsweise zu ungenau gegenüber den anderen sogleich ausgeschieden werden kann, aber die verbleibenden sind immer noch mannigfaltig genug. Von solchen Messmöglichkeiten, welche nur für ganz spezielle Untersuchungen eine gewisse physikalische Bedeutung besitzen, können hier mit kurzer Erwähnung zunächst ausgeschieden werden: die Grösse der Ablenkung von Kathoden- oder ähnlichen Strömungen als Mass für die felderzeugende Stromstärke; das optische Galvanometer mit Drehung der Polarisationsebene als Mass für die Stromintensität in der felderzeugenden Spule; das Lippmannsche Galvanometer mit dem Niveauunterschied zweier

Quecksilberkuppen, welcher durch Verschiebung einer Quecksilbermasse im magnetischen Felde verursacht wird, als Mass für die felderzeugende Stromstärke.

Die für Messzwecke übrigbleibenden Feldwirkungen kann man auf ein gemeinsames Prinzip zurückführen, nämlich auf die Erzeugung eines Kontrastes zwischen den Kraftlinienfeldern zweier Feldträger, von denen der bewegliche Feldträger gegenüber dem festen eine Bewegung anstrebt, die im Sinne einer Vergrösserung der magnetischen Kapazität (Verkleinerung des magnetischen Widerstandes des ganzen Systems) gerichtet ist und zur Messung der felderregenden Stromstärke dient. Je nach dem Charakter des zweiten Feldträgers und seinem Verhältnis zu dem ersten Feldträger, welcher stets aus dem von der zu messenden Stromstärke durchströmten Leiter, meist in Spulenform, besteht, kann man folgende vier Gruppen bilden:

1) Der zweite Feldträger besteht aus einem permanenten Magnet (Galvanometer im gewöhnlichen Sinne).
2) Der zweite Feldträger besteht aus einem elektromagnetisch durch die Messstromstärke erregten weichen Eisenkern (sogenannte Weicheiseninstrumente).
3) Der zweite Feldträger besteht gleichfalls aus einer stromdurchflossenen Spule (Elektrodynamometer).
4) Der zweite Feldträger besteht aus einer in sich geschlossenen Leiterbahn, eine Art Kurzschlusswicklung, in der durch Wechselinduktion von dem primären (Wechsel-) Feld Wechselströme (gewöhnlich in der Form sogenannter Wirbelströme) induziert werden und damit ein zweites mit dem primären kontrastierendes Wechselfeld erregt wird (Wechselinduktions-Instrumente).

Bezüglich des Verwendungsgebietes ist in gewissem Sinne ein kontinuierlicher Übergang von der Gruppe 1—4 gegeben:

Gruppe 1 ist nur zur Messung von Gleichstrom, oder bei Wellenstrom des mittleren Gleichstromniveaus befähigt.

Gruppe 2 ist zur Anzeige von Gleich- und Wechselstrom befähigt, wobei jedoch zwei getrennte Aichkurven zu benutzen sind, die im allgemeinen um so weiter auseinanderliegen, je massiver der Weicheisenkern ist, und je mehr er nach Material und Form zur Remanenz neigt.

Gruppe 3 ist für die Messung von Gleich- und Wechselstromstärken als gleichwertig anzusehen, solange durch Vermeidung geschlossener Leiterbahnen von erheblicher Ausdehnung in der Umgebung die Bildung und Rückwirkung tertiärer Wechselstromfelder vermieden wird.

Gruppe 4 endlich ist nur zur Messung von Wechselstromstärken befähigt.

Die Entwickelung von Gruppe 1 bewegte sich bis gegen Schluss der Periode in den alten, durch die vorausgegangene Periode vorgezeichneten Bahnen und brachte zahlreiche, aber nicht prinzipielle Änderungen und Verfeinerungen der früheren Formen, namentlich des Differentialgalvanometers. Die bemerkenswerteste Umgestaltung hinsichtlich der Empfindlichkeit erfolgte durch die von W. Thomson angegebene Ausführung, der unter Vermeidung von Magneten mit grösseren Längendimensionen durch seine Konstruktion eine erhebliche Annäherung der mehrfachen kurzen, vielfach direkt auf der

Rückseite des Spiegels befestigten Magnete an die stromdurchflossenen Spulenwindungen ermöglichte. Erwähnenswert ist auch die Empfindlichkeitssteigerung durch die Abänderung von ROSENTHAL (1884), welcher die Enden des stabförmigen Magneten rechtwinklig umbog und dieselben in die Öffnungen von enganschliessenden Spulen hineinragen liess. W. THOMSON war es auch, welcher für Zwecke der überseeischen Telegraphie in seinem Syphon-Rekorder (vgl. HEBERSCHREIBER, Bd. XII, 163) zuerst (1867) eine Umkehrung der beiden Feldträger benutzte und durch Verwendung eines feststehenden kräftigen permanenten Magnetfeldes bei beweglicher stromdurchflossener Spule das heute so überaus wichtige Drehspulenprinzip angab, bei dessen weiterer Ausgestaltung wohl D'ARSONVAL (1882) beteiligt war, das aber mit Unrecht vielfach mit dem Namen DEPREZ-D'ARSONVAL belegt wird. Der Übergang von den leicht gestörten älteren Formen mit beweglichem Magnet und Zuhülfenahme des Erdfeldes als Richtkraft, welche besonders G. WIEDEMANN zu Anfang der Periode als Spiegelinstrumente weiter ausbildete, zu den durch ihr geschlossenes starkes magnetisches Eigenfeld gegen äussere magnetische Störungen geschützten Drehspuleninstrumenten, vollzog sich trotz des Protestes einer Reihe von konservativer angelegten Physikern notgedrungen nahezu ebenso rasch, als die Ausbreitung von Starkstromanlagen und namentlich von elektrischen Bahnanlagen mit den daraus folgenden starken Störungen in Richtung und Wert der magnetischen Horizontalintensität fortschritt. Und zwar erstreckte sich dieser Umschwung, welcher die älteren Instrumente als nahezu wertlos und höchstens noch für einige Nullmethoden brauchbar bei uns praktisch ausser Kurs setzte, nicht nur auf das Gebiet der Spiegelinstrumente, sondern nahezu ebenso durchgreifend auch auf das Gebiet der transportablen technischen Präzisionsinstrumente. So machte er sich z. B. vor allem geltend in dem Ersatz des Torsionsgalvanometers mit Glockenmagnet, welches von W. SIEMENS sehr sorgfältig durchgebildet, doch im Gebrauch etwas subtil und auch gegen Konstantenänderung in der Nähe von Dynamos wenig geschützt geblieben war, durch die handlicheren und bei gleicher Genauigkeit weit bequemeren direkt zeigenden Drehspuleninstrumente, wie sie vor allem durch den Amerikaner WESTON (1888—1890) auf eine hohe Stufe der Vollendung gebracht und in ähnlicher Ausführung alsbald von nahezu allen Instrumentenfirmen nachgebaut wurden.

Die Entwickelung der Gruppe 2 — wenigstens eines Zweiges derselben — knüpfte wohl gedanklich an die BECQUERELsche elektromagnetische Wage (vgl. **28**) an unter Ersetzung des Magneten durch einen Eisenkern und Messung der einziehenden Stromwirkung ähnlich wie bei einer Federwage, eine Ausführungsform, die sich an den Namen KOHLRAUSCH (1884) knüpft. Die Ausbildung der Instrumente, welche die einsaugende Wirkung in Richtung der Spulenachse durch die Annäherung einer vom Strom elektromagnetisch erregten Weicheisenfahne an die innere Spulenwand ersetzte, knüpft sich an den Namen HUMMEL bezw. SCHUCKERT (1885). Die hierdurch nahegelegte Drehbewegung des Zeigers mag wohl dazu beigetragen haben den direkt zeigenden Schaltbrettinstrumenten die jetzt meist übliche runde Dosenform aufzuprägen, während die ältesten im Eisen sehr schwer gehaltenen Weicheiseninstrumente von SIEMENS & HALSKE als Standinstrumente die Pyramidenform zeigen.

Weitere Ausbildungen dieses Prinzipes, meist unter Benutzung der einziehenden Wirkung, wie die Instrumente der A. E.-G. und der neueren

Instrumente (1899) mit Luftdämpfung von Siemens & Halske, verfolgten auf Grund der Untersuchungen von Bruger (1891) über den Einfluss der Form des Eisenkernes in erster Linie den Zweck den Unterschied der Aichkurven für Gleich- und Wechselstrom möglichst klein zu machen, ein Ziel, das namentlich bei der letztgenannten Ausführung sehr nahe erreicht ist.

In diese Gruppe ist ferner ein anderer Apparat einzureihen, der neben seiner unmittelbaren praktischen Bedeutung auch als Messinstrument eine nicht zu unterschätzende Wichtigkeit erlangt hat, nämlich das Telephon. Sowohl direkt als akustisches Nullinstrument verwendbar, so in der Induktionswage von Hughes (1879), ferner an Stelle des Galvanometers der Brückenschaltung in der namentlich von F. Kohlrausch ausgebildeten Methode der Messung von Flüssigkeitswiderständen mit Wechselströmen, hat es auch als optisches Ausschlaginstrument Bedeutung erlangt. Das Bestreben der Eisenmembran sich in die Stellung des kleinsten magnetischen Widerstandes einzustellen versetzt sie in Verbindung mit den widerstrebenden elastischen Gegenkräften in Schwingungen, deren Weite von der jeweiligen Stromintensität in den Spulenwindungen des feststehenden Feldträgers abhängt und durch optische Hülfsmittel sichtbar gemacht werden kann. Zur Untersuchung von Wechselströmen mit Hülfe eines auf der Membran befestigten Spiegels wurde das Telephon als optisches Messinstrument zuerst von O. Fröhlich (1889) benutzt, hierauf (1891) von Wien etwas abgeändert und unter dem Namen „optisches Telephon“ als Messmittel für Wechselstrommessungen ausgebildet, so z. B. in seiner „neuen Form der Induktionswage“ (1893).

Die Instrumente der Gruppe 3 in ihrer Ausbildung als Spiegelinstrumente nach dem Urbilde des Weberschen Elektrodynamometers (vgl. 28) erfuhren später einige Abänderungen und unifilare Aufhängung durch Wiedemann (1874), F. Kohlrausch (1882), sowie durch J. Fröhlich (1878) mit Kugelform der beweglichen Spule, während das sogenannte Nadeldynamometer von Bellati (1883) und Giltay (1885) weniger ein Dynamometer als ein für Spiegelablesung eingerichtetes Weicheiseninstrument darstellt, das infolge der leichten Durchmagnetisierung der kleinen Eisennadel für Wechselströme nahezu gleichwertig wie für Gleichströme benutzbar ist.

Die nach dem dynamometrischen Prinzip gebauten Stromwagen, welche die Anziehungs- bezw. Abstossungswirkung zwischen feststehender und beweglicher Spule bei zusammenfallender Achsenrichtung beider zur Messung benutzen, sind von Cazin (1864), Joule (1864), Helmholtz (1881) u. a., ganz besonders aber wiederum von W. Thomson (1885—1887) in konstruktiver Hinsicht ausgebildet und vervollkommnet worden. Mit gekreuzten Spulenachsen, d. h. Drehungsantrieb der beweglichen Windungen gegenüber den festen, sind neben der Normalamperewage von Pellat (1886) namentlich die Instrumente mit Torsionsfeder zur Kompensation und Messung des Drehmomentes am beweglichen Feldträger von praktisch grosser Bedeutung geworden; hinsichtlich der Verwendung unter den Torsionsdynamometern wiederum die zur Messung der elektrischen Leistung benutzte Untergruppe der sogenannten Wattmeter, bei welchen die beiden kontrastierenden Felder in jedem Moment einerseits proportional dem Hauptstrom, andererseits proportional der Spannung gewählt werden, d. h. die beiden Spulen von verschiedenen Stromstärken, nämlich Hauptstrom und Spannungsstrom, durchflossen werden. (Weiteres siehe Bd. II.)

Allerdings muss erwähnt werden, dass gerade das Wattmeter, welches für den Wechselstromtechniker das wichtigste Messinstrument bildet, bei physikalischen Untersuchungen bislang so gut wie ausser Verwendung geblieben ist, obwohl es für die Klärung der energetischen Verhältnisse bei allen Ausgleichvorgängen mit Wellenstromcharakter eigentlich unersetzbar ist.

Während zur Messung von Stromstärken die Dynamometer mit der gleichen Stromstärke in beiden Spulen hauptsächlich von Siemens & Halske ihre Ausbildung erfuhren und trotz mangelhafter Dämpfung und der etwas unbequemen Torsion von Hand bis gegen Schluss der Periode ihren Platz behaupteten, erfolgte auf gleichem Prinzip die Ausbildung der lange Zeit anerkannt besten Wattmeter von Ganz & Co. In den letzten Jahren sind aber diese Instrumente immer mehr den direkt zeigenden und gut gedämpften Ausführungen gewichen, welche jeden Augenblick die Ablesung gestatten, ein bei elektrischen Untersuchungen praktisch so überaus wichtiges Moment, dass es die zuverlässige Durchführung der Messungen in vielen Fällen überhaupt erst möglich machte. Diese letztgenannten Ausführungen, welche in ihrem ganzen konstruktiven Aufbau den Einfluss mancher wertvollen, zuerst von Weston gegebenen Winke verraten, sind in mustergültiger Form zuerst (1899) von Siemens & Halske ausgebildet worden, nachdem verschiedene vorausgegangene Versuche zur Erlangung direkt zeigender Wattmeter, wie z. B. diejenigen von Hartmann & Braun (1896) keine befriedigenden Resultate geliefert hatten. Interessant sind auch die allerneuesten Ausführungen der A. E. G. (1901) unter Verwendung eines magnetischen Rückschlusses aus gut unterteiltem Eisenblech.

Die Instrumente der Gruppe 4 sind ihrem Messprinzip nach die jüngste Klasse von Strommessern, da sie auf den von Elihu Thomson (1886) entdeckten Erscheinungen (vgl. **39**) beruhen und entweder ein einfaches Wechselfeld mit einseitiger Abblendung bezw. mit Einseitigkeit der magnetischen Widerstandsverhältnisse zur Erzeugung des Ausschlages abhängig von der das primäre Wechselfeld erregenden Stromstärke benutzen, oder auch als sogenannte Ferrariszeiger das von letzterem (1887) entdeckte Drehfeldprinzip in irgend einer Modifikation anwenden. Die Ausbildung dieser Strommesser hat erst in den letzten Jahren, namentlich durch die A. E. G. sowie Siemens & Halske, eine grössere praktische Bedeutung erlangt. (Weiteres siehe Bd. II.)

Die Elektrizitäts z ä h l e r, welche als von rein technischer Bedeutung für die physikalischen Messungen vorläufig kaum in Betracht kommen, beruhen auch auf einem der vorstehenden Messprinzipien, nur unter Hinzuziehung der Zeitdimension, weshalb namentlich solche Prinzipien bevorzugt werden, welche, wie das letzte, einen Übergang von dem einfachen Ausschlag oder einer begrenzten Drehung zur kontinuierlichen, oder richtiger einseitig unbegrenzten Drehung und damit Zählung gestatten.

Für die Entwickelung der Messtechnik war neben der Ausbildung der Messinstrumente eine zuverlässige Festlegung der Masseinheiten, sowie die Schaffung von Vergleichnormalen mit hinreichender internationaler Übereinstimmung als Grundlage der meisten Messmethoden und als Voraussetzung der Vergleichbarkeit von Messergebnissen durch Aichung der Messmittel in Einheiten des C-G-S-Systems von grosser Wichtigkeit. Erst dadurch wurde das in der Physik bisher fast allgemein übliche relative Messen, d. h. in be-

liebigen oder zum mindesten unzureichend festgelegten Einheiten, wie z. B. DANIELL als Spannungseinheit, in ein solches mit genau definierten und reproduzierbaren Einheiten übergeführt. Aus diesem Grunde bildet die Festlegung des Ampere sowie des wahren Ohm und dadurch auch unter Hinzunahme des OHMschen Gesetzes zugleich diejenige des Volt, weiterhin des Watt u. s. f. eine gewisse Epoche für die elektrischen Messungen.

Als unerlässliche Vorbedingung für die Reproduzierbarkeit von Widerstandsmasseinheiten und für die Herstellung von Vergleichnormalen war daher mit Rücksicht auf die Verschiedenheit des Leitvermögens fester Metalle, auch bei vermeintlicher Reinheit (vgl. **36**), die Auffindung eines Normalmetalles von stets gleichem Leitvermögen durch W. SIEMENS (1860) in Gestalt des destilliertem Quecksilbers und die Einführung der hierauf gegründeten SIEMENS-Einheit ein bedeutungsvoller Fortschritt, ebenso wie die Herstellung von Vergleichnormalen in dieser allerdings zunächst noch ausserhalb des C-G-S-Systems stehenden SIEMENS-Einheit. Infolge nicht genügender Übereinstimmung der ersten absoluten Ohmbestimmungen wurde auf dem Pariser Kongress (1881) zunächst eine angenäherte Einheit als sogenanntes legales Ohm (106·0 cm) angenommen, das nach Durchführung genauerer absoluter Ohmbestimmungen (weiteres siehe Bd. II, auch Wk. IIIb, 480 u. ff.), sowie einem kritischen Bericht über den wahrscheinlichen Wert des Ohm von E. DORN (1893), endgültig durch das sogenannte internationale Ohm (106·3 cm) ersetzt wurde.

Inzwischen war auch das wahre Ampere in seinen elektrolytischen Wirkungen genauer ermittelt und das Silbervoltameter als das zuverlässigste Zwischenglied erkannt worden, sodass eine Normal-Aichanweisung, gegründet auf die Untersuchungen von RAYLEIGH und SIDGWICK (1884), sowie F. und W. KOHLRAUSCH (1886) über das elektrochemische Äquivalentgewicht des Silbers eine hinreichende Festlegung des Ampere gestattete.

Als Spannungsnormale wurde ein Zink-Platin-Element in der von LATIMER CLARK (1878) angegebenen Form als am meisten zuverlässig gefunden. Dieses Element, sowie eine thermisch etwas konstantere Ausführung von CARHART (1889) ohne Überschuss von Zinksulfatkrystallen wird überwiegend als Normale verwendet, wozu in den letzten Jahren noch ein von WESTON angegebenes Kadmium-Platin-Element mit sehr geringem Temperaturkoeffizienten getreten ist. Die vorübergehend gleichfalls als Normalelemente betrachteten Zink-Kupfer-Elemente in der Ausführung nach KITTLER (1882), BEETZ (1884), FLEMING (1886) u. a. sind gegenwärtig als Normalen ausser Kurs gesetzt wegen unzureichender Zuverlässigkeit. (Weiteres über die Masssysteme, Messnormalen, Aichungen u. s. w. siehe Bd. II.)

41. Entwickelung der Messmethoden.

Die Mess methoden, welche in Bd. II ausführlicher behandelt werden, haben in dieser Periode weniger nach Seite der Gleichstrommessungen, deren Grundlagen bereits die vorige Periode lieferte (vgl. **29**), als vielmehr nach Seite der Wechselstrommessungen ihre Ausgestaltung erfahren. Diese Thatsache erklärt sich ohne weiteres aus den zwei Umständen, dass der Wechselstrom ganz ausgesprochen ein Kind der letzten Periode ist (vgl. **34**) und daher auch die Methoden seiner Messung, und dass ferner die Mannigfaltigkeit der bei ihm praktisch in Frage kommenden elektrischen Grössen und somit auch der Messmöglichkeiten ungleich grösser ist als beim Gleichstrom.

Die Methoden zur Ermittelung einer elektrischen Grösse lassen sich auch in zwei Hauptklassen scheiden: solche, bei denen unter direkter Zuhülfe-

nahme der Begriffsgleichungen, wie sie die Formulierungen der elektrischen Ausgleichgesetze darstellen (vgl. H. I, 2), die gesuchte Grösse dadurch als Restfaktor bestimmt wird, dass alle übrigen Grössen der benutzten Begriffsgleichung gemessen werden, beziehungsweise als gegeben betrachtet werden können; ferner solche, bei denen die gesuchte Grösse auf Vergleichnormalen derselben Dimension oder in einigen Fällen, wie bei dem Verhältnis von Selbstinduktion und Kapazität, auf solche mit reziproker Wirkungsweise zurückgeführt werden. Diese Teilung fällt in vielen Punkten zusammen mit der Unterscheidung in Ausschlags- und Nullmethoden.

Die geistigen Väter der einzelnen Methoden anzugeben, namentlich soweit die Übertragung auf die Wechselstromgrössen in Frage kommt, ist in vielen Fällen kaum möglich, da dieselben Methoden häufig unabhängig voneinander an verschiedenen Stellen aufgefunden wurden, teils vorübergehend in Vergessenheit geraten, oder auch gar nicht ausführlich publiziert und erst nachträglich reklamiert wurden. Auch sind öfters die in die Litteratur als neu mit besonderem Namen übergegangenen Methoden im Grunde genommen nur kleine Abänderungen älterer. Aus diesem Grunde soll hier auf eine viel zu weit führende kritische Sichtung verzichtet werden.

Von den Gleichstrommessmethoden zur Ermittelung von Leitungswiderständen ist aus der erstgenannten Klasse die Ermittelung aus Spannung und Stromstärke praktisch für die Technik von stetig wachsender Bedeutung geworden. Eine weitere Methode dieser Klasse bildet die für sehr hohe Widerstände (Isolationswiderstände) wichtige Ermittelung aus der Entladung eines Kondensators von bekannter Grösse C, welche nach Angabe von MAXWELL (vgl. Tr. I, 355) W. SIEMENS zuerst angegeben hat (vermutlich um 1857).

Von den Methoden der zweiten Klasse hat namentlich die Vergleichung von Widerständen in der WHEATSTONEschen Brückenverzweigung (vgl. **29**) noch einige wichtige Anpassungen an die sehr mannigfaltige Art und Grösse von Leitungswiderständen erfahren, so namentlich in der W. THOMSONschen Doppelbrücke (1861) und in der viermaligen Nullpunktsmethode von MATTHIESSEN und HOCKIN (vgl. MAXWELL I, 352), Methoden, welche beide Nettowiderstände unter Eliminierung des durch Verbindungsleitungen bedingten Fehlers zu messen gestatten.

Eine für Strahlungsmessungen wichtige Verwendung hat die WHEATSTONE-Schaltung in dem Bolometer, namentlich von WILL. SIEMENS und von LANGLEY ausgebildet, gefunden; hierbei dient die elektrisch sicher nachweisbare Widerstandsänderung eines feinen Eisen-, oder Platin-, oder Nickel-Drahtes, welcher den einen Brückenzweig bildet, als Reagens für eine an ihm stattfindende Energieumsetzung bezw. Erwärmung. Es ist dies sonach einer von den vielen, hier nicht weiter zu behandelnden Fällen, in denen wegen Einfachheit und Genauigkeit der elektrischen Messmethoden die Messung anderer physikalischer Grössen durch Übertragung auf das elektrische Gebiet indirekt erfolgt.

Auch die Differentialgalvanometer-Methoden (vgl. **29**) haben einige Bereicherungen erfahren, so seine Verwendung im Nebenschluss nach HEAVISIDE (1873), ferner nach KIRCHHOFF und HANSEMANN (1881), endlich die Methode des übergreifenden Nebenschlusses nach F. KOHLRAUSCH (1883). Die Angabe, wie die WHEATSTONE-Schaltung abzuändern sei, um die Messung des Gal-

vanometerwiderstandes ohne ein zweites Instrument zu ermöglichen, machte W. Thomson (1871), diejenige zur Bestimmung des Batteriewiderstandes ohne zweite Stromquelle unmittelbar vorher Mance.

Die Ermittelung der Leitungskoeffizienten mit Wechselstrom neigt in der technischen Praxis auch immer mehr zu den Methoden der ersten Klasse unter Heranziehung der elektrischen Ausgleichgesetze, während die (mehr physikalischen) Laboratoriumsmessungen ihren Schwerpunkt in den Nullmethoden finden, welche die Wheatstonesche Brückenschaltung in einer für die Wechselstromgrössen geeigneten Weise abändern, oder mit anderen Worten diese elektrische Widerstandswage (für Leitungswiderstände nach Ohm) in eine elektrische Kapazitätswage bezw. Wage zur Vergleichung von Induktionskoeffizienten umwandeln.

Diese Methoden der abwägenden Vergleichung von elektrischen Ausgleichwiderständen aller Art arbeiten teils mit Gleichstrom unter Benutzung der Stromänderungen bei Anfang und Schluss der Bewegung, teils mit dauerndem Wechselstrom, wobei entweder Telephon bezw. Elektrodynamometer als Brückeninstrumente dienen oder Galvanometer mit Verwendung rotierender Doppelkommutatoren. Diese letzteren Vorrichtungen, welche bei wechselndem Strom in den Brückenzweigen doch die Benutzung von Gleichstrom in den Diagonalen, d. h. Stromquelle und Galvanometer gestatten, sind im Prinzip wohl zuerst durch eine Doppelwippe von Helmholtz (1851) angegeben und später von Ayrton und Perry (1884) unter dem Namen Secohmmeter in die Messtechnik eingeführt worden.

Mit Ausnahme der Schaltungen der Brücke als Kapazitätswage, wie sie von de Sayty (1871) unter Ersatz zweier Brückenwiderstände durch die zwei zu vergleichenden Kondensatoren angegeben und von W. Thomson (1873) zu Differentialmethoden vervollkommnet wurden, gehen diese Messmethoden fast durchweg auf die von Maxwell (1873) in seinem Hauptwerk angegebenen Schaltungen zur Vergleichung von Wechsel- und Selbstinduktionskoeffizienten untereinander oder mit Kapazitäten zurück.

Die Zurückführung der zu messenden Kapazität auf Widerstandseinheiten, welche sich für die Wheatstone-Schaltung gleichfalls von Maxwell in der Theorie angegeben findet, wurde von J. J. Thomson (1883) für Messzwecke ausgestaltet und in entsprechender Weise abgeändert zur Vergleichung eines Selbstinduktionskoeffizienten mit einem Ohmschen Widerstand von Rayleigh (1882) angegeben.

Das gegen Schluss der letzten Periode von verschiedener Seite angegebene Verfahren zur Kompensation von Spannungen (vgl. **29**) gewann in dieser Periode für Aichzwecke ständig an Bedeutung und wurde nicht nur in seiner ursprünglichen Form zur messenden Vergleichung von Spannungen mit Hülfe des Normalelementes verwendet, sondern auch als Umkehrung zur Aichung von Stromstärken aus der Spannung an den Enden von Widerstandsnormalen, endlich auch zur Vergleichung von Normalwiderständen ausgebildet. Das Fehlen eines derartigen Kompensationsverfahrens für Wechselstrommessungen bildete eine gewisse Lücke. Dem Messprinzip nach bildet zwar die zuerst von Hughes (1879) angegebene und als Induktionswage bezeichnete Messanordnung zur Widerstandsvergleichung mit Wechselstrom und Telephon ein gewisses Analogon zu jenem, doch eignet sich dieselbe mehr zu qualita-

tiven Untersuchungen und Materialdurchforschungen mit Hülfe der elektrischen Leitfähigkeit als zu quantitativen Messungen.

Neben den allgemeiner benutzten Messmethoden haben für spezielle physikalische Untersuchungen natürlich noch eine sehr grosse Zahl von mehr oder weniger komplizierten Messanordnungen und Schaltungen Verwendung gefunden, welche speziellen Zwecken angepasst nur im Zusammenhang mit den Versuchsergebnissen im späteren Teil bezw. in Bd. II Erwähnung finden können.

42. Auffassungen der elektromagnetischen Erscheinungen.

Als Abschluss dieses Umrisses der letzten Entwickelung der Elektrophysik soll noch ein Blick auf die Auffassung und die mathematische Behandlung der elektrischen Erscheinungen geworfen werden, also auf die geistige Verarbeitung und Verknüpfung der Erfahrungsthatsachen nach Richtung der Hülfsvorstellungen, Hypothesen, Theorien. Die Auffassungen werden im folgenden Abschnitt ausführlicher behandelt und sind zum Teil auch bereits im Vorausgegangenen im Zusammenhang mit den Erscheinungen angegeben worden, wo dies angebracht erschien, so dass hier zunächst die an anderer Stelle nicht näher behandelten Theorien bezw. Hülfsvorstellungen zu erwähnen wären, während bei jenen einige zusammenfassende Sätze genügen.

Wie schon früher erwähnt (**31**) hatte die ältere Coulombsche Fernwirkungstheorie durch W. Weber (vgl. **97**) eine folgerichtige Erweiterung erfahren durch Annahme einer Abhängigkeit der ponderomotorischen Wirkung von der Geschwindigkeit des elektrischen Fluidums. Hierdurch gelang es die elektrodynamischen Bewegungsantriebe (**23**), welche die alte Fernwirkungstheorie nicht zu erklären vermochte, mit der allgemeineren von W. Weber in Einklang zu bringen. Das Webersche Gesetz, welches nicht nur die Erscheinungen der Elektrostatik und Elektrodynamik, sondern auch die der Induktion abzuleiten gestattet, nicht aber die Hertzschen Versuche, geht von der Theorie zweier Fluida oder der elektrischen Doppelbewegung aus. Bevor alle auf Punktgesetzen beruhenden Fernwirkungstheorien durch die theoretischen Untersuchungen von Helmholtz (1870 bis 1881) erschüttert und endgültig durch die experimentellen Versuche von Hertz beseitigt wurden, sind noch einige andere „Punktgesetze" auf Grund anderer Auffassungen abgeleitet worden. So das Webersche von C. Neumann (1871) für die Vorstellung, dass nur das eine der beiden elektrischen Fluida sich bewegt, das andere ruht; ein von dem Weberschen abweichend gefasstes Gesetz für zwei Fluida durch Riemann (1876); endlich ein weiteres von Clausius (1876) auf Grund der unitarischen Theorie.

Als eine Art Übergang von den Fernwirkungstheorien zu den Feldtheorien kann man die verschiedenen Äthertheorien auffassen, welche in dieser Periode entstanden und welche darin übereinstimmen, dass sie den „Äther" mit der Elektrizität identifizieren. Zunächst scheint hier die Theorie von Edlund (1871 und ff.) beachtenswert, wonach jeder Körper aus materiellen Molekülen mit Ätherhüllen und freiem Äther besteht; Überschuss oder Manko an letzterem ergiebt + bezw. —; der galvanische Strom ist ein Ätherstrom, jede EMK wirkt als Ätherpumpe u. s. f. Über die Feldbeschaffenheit wird jedoch keine nähere Vorstellung entwickelt, jedoch im Gegensatz zu den rein dynamischen Fernwirkungstheorien angenommen, dass die elektrische Kraft als Ursache der ponderomotorischen Wirkungen Zeit benötige, um die Entfernungen zu überwinden.

Eine von HELM (1881) entwickelte Theorie der elektrischen Erscheinungen geht gleichfalls davon aus, dass er in jedem Körper festen elastischen und flüssigen Äther unterscheidet und die Eigenschaften der Dielektrika durch das Überwiegen des festen, der elektrischen Leiter durch Überwiegen des flüssigen Äthers erklärt, sodass auch bei ihm der elektrische Strom durch einen Strom flüssigen Äthers dargestellt wird. In den übrigen Annahmen weicht er aber merklich von EDLUND ab. Während bei EDLUND der elektrische Widerstand nicht durch Reibung, sondern durch hydrostatischen Druck erklärt wird, nimmt HELM zwischen flüssigem und festem Äther eine besondere Art von Reibung an, welche sich am festen Äther des Leiters in JOULEsche Wärme umsetzt, während sie nach aussen elastische Verschiebungen erzeugt. Letztere werden zur Erklärung der magnetischen Erscheinungen und der Induktion herangezogen.

Eine Äthertheorie, welche noch einen Schritt weiter geht und auch zu den Feldtheorien gerechnet werden könnte, ist die von OLIVER LODGE in seinen „Modern views of Electricity" (1892) entwickelte. Sie unterscheidet sich insofern merklich von den beiden vorausgegangenen, als LODGE nicht nur einen Äther, sondern entsprechend der dualistischen Theorie zwei verschiedene Äther annimmt, von denen der eine die positive, der andere die negative Elektrizität bildet. (Weiteres siehe **71.**)

Die vorerwähnten unitarischen Äthertheorien stossen auf gewisse Schwierigkeiten, wenn die elektrischen und optischen Erscheinungen durch denselben Äther erklärt werden sollen, da die Eigenschaften, welche derselbe in dem einen und dem anderen Falle haben muss, bald flüssig, bald fest elastisch, Widersprüche einschliessen, was stets, wie bei HELM, auch eine Zweiteilung des Äthers benötigte. W. THOMSON suchte (1888) die Schwierigkeit dadurch zu beseitigen, dass er dem Äther als raumerfüllender Menge zwar völlige Plastizität zuschrieb, d. h. keinen Widerstand gegenüber einer Formänderung nach Art einer vollkommenen Flüssigkeit, wohl aber den einzelnen Äthermolekülen einen Widerstand gegen Verdrehung, wie er einem drehenden Kreisel bezw. Giroskop eigen ist (vgl. auch bei Fig. 22). Diese Eigenschaft von THOMSON als „Quasirigidität" bezeichnet, ermöglicht ihm die Ableitung von Feldgleichungen, welche mit den MAXWELLschen identisch sind.

An dieser Stelle wäre auch noch die Erklärung von elektrischen Erscheinungen durch molekulare Rotationsschwingungen von HANKEL (1865 und ff.) kurz zu erwähnen, welcher die positive und negative Modifikation der Elektrizität durch kreisförmige Ätherschwingungen in dem einen oder anderen Drehsinn zu deuten sucht, wobei aber nicht die einzelnen Moleküle des Äthers oder der Materie für sich schwingen, sondern bei den Erscheinungen der freien Elektrizität gemeinsame Wirbel bilden. Diese Vorstellungen erscheinen aber gegenüber den vorgenannten etwas kompliziert.

Beachtenswerter sind die theoretischen Erwägungen, welche an die von BJERKNES (1881) beobachteten hydrodynamischen Erscheinungen anknüpfen, die in vielen Punkten mit den elektrodynamischen analog sind und jedenfalls die Möglichkeit nachweisen, scheinbare Fernkräfte durch Bewegung eines Zwischenmediums zu erzeugen — hier des der Auffassung unmittelbarer zugänglichen Wassers. Flachcylindrische Hohlkörper mit Kautschukmembranen bespannt, weisen in Wasser schwebend bei rythmischer Vibration der Kautschukwandungen und beiderseits gleicher Wechselzahl von Luft-

verdünnung und Verdichtung im Hohlkörper ponderomotorische Antriebe aufeinander auf, welche mit den elektrischen und magnetischen Anziehungs- bezw. Abstossungserscheinungen grosse Ähnlichkeit besitzen. Das Vorzeichen ist jedoch umgekehrt; also: Körper mit gleichsinnigen Pulsationen ziehen sich an, mit entgegengesetzten Pulsationen, d. h. in Phase um 180° versetzten Maxima der Membranelongationen stossen sich ab. Mathematisch sind diese Analogieerscheinungen von Riecke (1887) bearbeitet worden; später hat Korn (1896—1898) hier anschliessend eine Theorie der rhythmischen Pulsationen entwickelt und zum Teil auch experimentell bestätigt, welche nicht nur die elektrischen Erscheinungen, sondern auch die Gravitation auf diesem hydrodynamischen Wege zu erklären sucht.

Als Hülfsvorstellungen zur Auffassung des elektromagnetischen Erscheinungsgebietes, welche einen Übergang von den hydrodynamischen Theorien zu den reinen Feldtheorien mit Cykelbewegungen von Helmholtz und Hertz bilden, können die von Maxwell (1861) entwickelten Vorstellungen gelten (weiteres siehe im folgenden Abschnitt), wobei zum Unterschied von den Äthertheorien nicht zu übersehen ist, dass die Friktionsteilchen Maxwells, welche die Elektrizität darstellen, nicht ohne weiteres mit dem Äther zu identifizieren sind, sondern eigentlich als besonderer Stoff aufzufassen wären, ähnlich wie die Elektronen von H. A. Lorentz bei Nernst (vgl. **79**).

Zu erwähnen wäre schliesslich noch eine Theorie von J. J. Thomson (1891), welche auch auf die Maxwellschen Feldgleichungen führt, indem sie von einem eigentümlichen, polypenartigen Verhalten der real gedachten Induktionsröhren zwischen den Molekülen bezw. Atomen eines elektrisierten Körpers ausgeht. Diese Vorstellung ist namentlich bei Verfolgung der dielektrischen Erscheinungen, sowie der Gasentladungen zuweilen benutzt worden (siehe auch **128** am Ende).

Wie bereits an anderer Stelle betont (**35**), war trotz Faraday und Maxwell von einem eigentlichen Durchdringen der Feldvorstellungen bei der überwiegenden Mehrzahl der Physiker, das ist bei der sogenannten schulmässigen Auffassung, vor allem auf dem Kontinent, in den ersten vier Decennien dieser Periode keine Rede, wenn auch einzelne tieferblickende Forscher, wie Werner Siemens von jeher (vgl. **35**), andere nach der endgültigen Aufdeckung von Widersprüchen in den mathemathisch handlich erscheinenden und schulmässigen Fernwirkungstheorien durch Helmholtz (vgl. oben), sich innerlich immer mehr mit der Faraday-Maxwellschen Auffassung befreundeten. Daher kam es wohl auch, dass die Entscheidung zwischen den beiden in ihren Grundlagen verschiedenen und zum Teil gegensätzlichen Auffassungen, wie sie H. Hertz (1887 bis 1891) durch ein experimentum crucis gelang, den notwendigen Umschwung der Schulauffassung verhältnismässig schnell herbeiführte.

Ein eigenartiger Zufall wollte es, dass in denselben Jahren auch auf elektrochemischer Seite eine für die Elektrophysik ausserordentlich anregende und gut gestützte Auffassung, die Theorie der freien Jonen (vgl. **37**, sowie **83** u. ff.), entwickelt wurde. In Physikerkreisen wurde dieselbe anfangs mit wenig freundlichen Augen angesehen, teils weil sie den alten Streit über die Berührungselektrizität mit betraf und von seiten der Gegner ins Feld geführt wurde, teils weil die Untersuchungen von Hertz die

Auffassung der Physiker im antimateriellen Sinne zu gunsten einer rein kinetischen Auffassung der elektrischen Ausgleichvorgänge etwas einseitig beeinflusst hatten. Aus demselben Grunde war man auch bemüht die „grobsinnlichen“ weil teilweise elektrisch-materiellen Hülfsvorstellungen von MAXWELL (vgl. **64** und ff.) durch rein bewegungsmechanische, wie sie die Cyklentheorie von HELMHOLTZ gewährte, zu ersetzen. Auf die Schnelligkeit, mit welcher gegen Ende des Jahrhunderts hierin ein Umschwung eintrat und eine Befreundung der schulmässigen Elektrophysik mit dem anderen (materiellen) Standpunkte der Jonentheorie, wurde bereits früher hingewiesen, auch unter Hinweis auf die tieferliegenden Gründe (vgl. **37**). Die Verschiedenheit der Auffassungen, beziehungsweise Arbeitshypothesen innerhalb der Jonenvorstellung über die elektrischen Ausgleichvorgänge durch Strömungen, ob Korpuskulartheorie nach J. J. THOMSON, ob Elektronentheorie nach NERNST kann man wohl kurz dahin charakterisieren: die Korpuskulartheorie nimmt beim elektrisch Aktivwerden des in seiner Ganzheit unelektrischen Molekels eine Zerlegung in zwei zwar sehr ungleich grosse, aber doch beiderseits materielle Teile an, das in seinem Gewichte nur sehr wenig veränderte positiv elektrische Hauptmolekel und das negativ elektrische Korpuskulum, welches die Differenz zwischen unelektrischem Molekel und dem positiv elektrischen Hauptmolekel darstellt, eine Differenz, die jedenfalls kleiner als 1000 — 999 ist; die Elektronentheorie nimmt an, dass bei der Elektrisierung eine Lostrennung des nicht völlig gewichtlosen Elektrons, gewöhnlich als negative Elektrizität bezeichnet, stattfindet, d. h. dass die Elektrizität im Gegensatz zum materiellen Molekül allein zu bestehen und zu strömen vermag und dies etwa nach Art der MAXWELLschen Friktionsteilchen auch in den metallischen Leitern thut. (Weiteres siehe **79**).

Die Verbindung zwischen den beiden für sich entstandenen Vorstellungsgebieten über die elektrischen Ausgleichvorgänge in Gestalt von Schwingungen nach HERTZ einerseits, in Gestalt von Strömungen nach der Jonenhypothese andererseits, bietet offenbar noch Schwierigkeiten, soweit der Übergang von dem einen zum anderen in Frage kommt, wenn auch der von H. A. LORENTZ (1895) mit seiner Elektronentheorie (vgl. hierzu **79**, ferner Ph. Z. II, 454, sowie auch H. I, 3, § 65) gemachte Versuch, die Jonen in die MAXWELLsche Theorie einzugliedern, als gelungen gelten kann, allerdings unter Verzichtleistung auf klare mechanische Vorstellungen. Diese Vorstellungsschwierigkeiten zu beheben ist eine Aufgabe, deren Lösung zunächst zu erstreben wäre, und es will fast scheinen, als wenn die den Äthertheorien näherstehende Elektronenvorstellung sich dieser Lösung mehr nähert als die Korpuskularvorstellung. Als Arbeitshypothesen sind wohl aber beide geeignet Anregung in Form von Fragestellungen zu gewähren, die das Experiment zu entscheiden hat, gleichzeitig unser Wissen bereichernd, sowie unsere Vorstellungen weiter klärend.

Vielleicht ist die weitere Entwickelung unserer Vorstellungen über die elektrischen Ausgleicherscheinungen unter Aufgabe der Stromvorstellung auch nach einer ganz anderen Seite zu suchen, welche sie mit den Wärmeerscheinungen in viel innigere Berührung bringt. Ein sehr beachtenswerter Versuch nach dieser Richtung scheint die neueste Publikation auf diesem Gebiete zu sein: „Über eine mechanische Darstellung der elektrischen und magnetischen Erscheinung in ruhenden Körpern“ von L. GRAETZ (1901 A. d. Ph. V, 375). Die hier entwickelte Auffassung, welche wohl der Auffassung

von POYNTING-EBERT (76) noch am nächsten stehen dürfte, will jene Verbindung zwischen der konvektiven Jonenleitung in allen dissoziierbaren Medien und der metallischen Leitung durch eine neue Auffassung der letzteren ermöglichen, deren Grundidee in folgendem Satze (vgl. a. a. O. Seite 393) ausgedrückt ist: „Der elektrische Strom in den metallischen Leitern ist weder ein Ätherstrom noch überhaupt ein Strom längs der Leiter. Er besteht nur in der Umwandlung gradlinig fortschreitender Bewegung der Moleküle in Wärmebewegung, er ist also durchaus ein Molekularphänomen, kein Ätherphänomen."

Man kann daher auch kaum sagen, dass das Ende des Jahrhunderts einen gewissen Abschluss in unsere Auffassungen vom Wesen der Elektrizität gebracht habe, vielmehr ist eine stärkere Gährung in denselben gerade jetzt nicht zu verkennen.

43. Theoretisch-mathematische Behandlungen der Elektrophysik.

Die mathematische Behandlung der elektrischen Erscheinungen in Gestalt einer möglichst einheitlichen Theorie ist gleichfalls im letzten Abschnitt dieses Bandes gesondert behandelt, weshalb die entwickelungsgeschichtlichen Bemerkungen hier auf einige grobe Umrisse beschränkt werden können.

Die Formulierung der Gesetze auf Grund bestimmter Versuchsbedingungen erfährt eine Erweiterung und Ergänzung durch Übertragung der induktiv gefundenen Begriffsgleichungen (Grundgesetze) auf andere von der unmittelbaren Beobachtung abweichende Verhältnisse mit Hülfe der Zählerfahrung oder Mathematik (siehe 47 u. ff.). Die so durch Deduktion erlangten Endergebnisse werden als Theorie der weiteren experimentellen Bestätigung bedürfen, dieselbe anregen und so unser Erfahrungsgebiet bereichern. Die Verschmelzung möglichst vieler grundlegender Begriffsgleichungen zu einem einheitlichen Ganzen durch architektonisch gegliederte Gleichungssysteme ist das Endziel, welchem die bedeutendsten Forscher in Richtung der Theorie zustreben. Je umfassender und einheitlicher die Anlage, je klarer der Aufbau, desto grösser die Wertschätzung des Wissenschaftsbaumeisters. Der zur richtigen Wertschätzung erforderliche Überblick pflegt aber erst aus einiger Entfernung möglich zu sein. Ähnlich nun wie der sich dem Beschauer stärker aufdrängende Vordergrund in einer Berglandschaft eine vergleichende Höhenschätzung erschwert, so auch die zeitlich näher liegenden Leistungen die Wertung der Wissenschaftsbaumeister der letzten Periode. Von einem etwas erhöhten Standpunkt werden aber die ragenden Gipfel wohl zu erkennen sein, wenigstens in soweit, dass man zunächst eine Unterscheidung in zwei Klassen vornehmen kann, die man vielleicht analog einer Einteilung der Künstler auf dem Gebiete der schöngeistigen Wissenschaften mit den Namen Genies und Talente kenntzeichnet. Hierbei ist an dieser Stelle nicht auf Entdeckungen Rücksicht zu nehmen, die zufällig grosse praktische Bedeutung erlangt haben, als vielmehr auf die Grösse der geistigen Leistungen an sich. Als Genies würden die bahnbrechenden Forscher zu gelten haben, deren Geisteskraft sich gleichsam unwiderstehlich auf die Denkweise vieler anderer Forscher überträgt und so weitere Kreise durchdringend der Wissenschaft eines Teilgebietes zeitweilig den Stempel aufdrückt; als Talente die formgewandten Forscher, welche durch Genies angeregt den Ausbau von Teilgebieten durchführen oder auch die feinere Ausgestaltung der von jenen gelieferten Grundlagen beziehungsweise die Fassade liefern. Allerdings würde man weiterhin dazu gedrängt grössere

und kleinere Talente zu unterscheiden, eine Unterscheidung, die aus dem oben bezeichneten Grunde um so schwieriger wird, je näher man der Gegenwart kommt, abgesehen von der Vorsicht, mit welcher überhaupt solche — für einen Ordner leider nicht entbehrliche — Klassifizierungen und Schachtelungen aufzufassen und zu gebrauchen sind (vgl. hierzu den Schluss von **108** und **111**). Sucht man nach den ragenden Gipfeln der letzten Periode, so lenken unter den Forschern mit abgeschlossenen oder wenigstens so gut wie abgeschlossenen Leistungen zunächst vier die Blicke auf sich. Vorerst Maxwell und neben ihm sein Landsmann William Thomson (Lord Kelvin). Zu ihnen gesellen sich in Deutschland Helmholtz und H. Hertz.

Für die neuere Elektrizitätswissenschaft, welche auf kinetischer Grundlage aufgebaut ist, im Gegensatz zu der älteren Fernwirkungstheorie auf dynamischer Grundlage, kann man Maxwell mit der in seinem Hauptwerk (Treatise on electricity and magnetism 1873; II. Auflage 1881, deutsch 1883 von Weinstein) gegebenen mathematischen Behandlung dieses Gebietes als eine Quelle betrachten, auf die man noch lange zurückgehen wird.

Die vielseitigen theoretischen Förderungen und Anregungen, welche unsere Wissenschaft in England durch William Thomson, in Deutschland durch H. Helmholtz erfahren hat, lassen zwischen beiden manche Parallele, nicht nur in zeitlicher, sondern auch intellektueller Beziehung zu, wenn man die Art ihrer Einwirkung auf die Wissenschaftsentwickelung betrachtet, für deren Mannigfaltigkeit ihre gesammelten Abhandlungen zeugen. Vom Beginn der Periode an, welche bei beiden durch bahnbrechende elektrische Arbeiten eingeleitet wurde (auf dem Gebiete der Energiegleichungen H. Helmholtz 1847: „Über die Erhaltung der Kraft"; William Thomson 1841 und 1845: Uniform Motion of Heat and Mathematical Theory of Electricity), haben dieselben nahezu während des vollen Zeitraumes eines halben Jahrhunderts immer und immer wieder auf die theoretische Entwickelung der Elektrizitätslehre einen hervorragenden Einfluss genommen.

Im Gegensatz zu diesen beiden Altmeistern war es H. Hertz, einem Schüler von Helmholtz, nur verhältnismässig wenige Jahre — er starb am 1. Januar 1894 im Alter von noch nicht 37 Jahren — vergönnt, an dem Ausbau der Elektrizitätstheorie mitzuwirken; dennoch sind seine Leistungen auf diesem Gebiete derart, dass er den genialen Wissenschaftsbaumeistern zugezählt werden muss. Von den grossen Talenten, welche namentlich auf dem Gebiete der Elektrizitätstheorie gewirkt haben, reicht G. Kirchhoff aus dem Ende der vorigen Periode (vgl. **31**) weit in diese letzte herüber. Seine zahlreichen Arbeiten über elektrische Strömungen und Verteilungen (siehe Ges. Abh. 1882, Leipzig) sichern ihm, abgesehen von seinen grossen Leistungen auf anderen Gebieten, besonders dem der Licht- und Wärmestrahlungen, einen hervorragenden Platz in der Entwickelung unseres Gebietes, wenn er auch, ebenso wie die gleichzeitigen Theoretiker der deutschen Schule: W. Weber, Riemann, Clausius, Neumann (Vater und Sohn), von Fernwirkungstheorien ausging. Von den Forschern, welche die Theorien von Maxwell, Helmholtz und Hertz weiter ausgebaut haben, seien hier aus der grossen Zahl nur einige mit zusammenhängenden Arbeiten hervorgehoben: zunächst Heaviside (1889 und ff.), Poincaré (1890), H. A. Lorentz (1891 u. ff.) und L. Boltzmann (1893 u. ff.), ferner Föppl (1894), H. Ebert (1896 und 1897, siehe namentlich auch H. I, 3) und E. Cohn (1900). Wegen

wichtiger theoretischer Abhandlungen auf diesem Gebiete sind ferner RALEIGH (1886), F. STEFAN (1887) und G. HELM (1893) anzuführen; siehe ferner hierzu die Litteraturzusammenstellung in Wd. IV, 1038.

Schlussbetrachtung

Es ist eine bemerkenswerte Übereinstimmung in der Bethätigung der genial beanlagten Forscher, dass jeder früher oder später dahin gedrängt wurde, die überlieferten Fundamente und Grundbegriffe einer kritischen Sichtung zu unterziehen und so über das Gebiet der engeren Elektrizitätswissenschaft hinaus, auch den fundamentalen Grenzbegriffen der Physik ihre Aufmerksamkeit zuzuwenden. Das Ergebnis dieses philosophischen, d. h. auf das Wissensganze gerichteten Strebens ist vielleicht am reifsten in der Einleitung der nachgelassenen Schrift von H. HERTZ („Prinzipien der Mechanik") zum Ausdruck gekommen, welche eine erkenntnistheoretisch äusserst wertvolle Kritik der bisherigen Benutzung der fünf Grundbegriffe: Raum, Zeit, Kraft, Masse und Energie enthält; richtiger gesagt ist es eine Kritik der drei sich hieraus ergebenden Hauptsysteme der Physik, da Raum und Zeit von allen bisher als Ausgangsbegriffe angenommen wurden. Je nachdem aber als dritter gegebener Ausgangsbegriff die Kraft, die Masse oder die Energie gewählt wurde, ergaben sich die dynamische, die kinetische oder die energetische Auffassung der physikalischen Erscheinungen, von denen die erste, durch NEWTON begründet, fast zwei Jahrhunderte der Fernwirkungstheorie als Grundlage diente; während die zweite, welche die Elemente des von GAUSS und WEBER eingeführten absoluten Masssystems benutzt, mit der ersten in stetem Kampfe das elektromagnetische Gebiet von den 60er Jahren an durch die Arbeiten von FARADAY-MAXWELL-HERTZ eroberte; die dritte und jüngste endlich seit dem Jahre 1887 namentlich von HELM und W. OSTWALD verfochten, ist bemüht den Begriff Masse und damit zugleich die Atomistik als unberechtigt von ihrer Stelle zu verdrängen, um die Energie auf den Thron zu setzen. Dass die Grundlagen der Elektrizitätslehre bei der Entscheidung über diese Fragen aufs tiefste in Mitleidenschaft gezogen werden, hat der Kampf zwischen der ersten und zweiten Auffassung gezeigt. Das Ergebnis der Kritik ist daher auch für sie von der grössten Wichtigkeit und deshalb als Schlussbetrachtung dieses entwickelungsgeschichtlichen Abschnittes gewählt worden.

Das Ergebnis dieser Kritik (vgl. hierzu auch die höchst beachtenswerten Ausführungen des V. Vortrages in ROSENBERGER, Entwickelung der elektrischen Prinzipien, Leipzig 1898 bei A. BARTH) erscheint auf den ersten Anblick höchst betrübend: keine der drei Auffassungen vermag bis in ihre letzten Konsequenzen verfolgt, für sich allein zu befriedigen und es zeigt sich, dass eine absolute kinetische Wissenschaft ebenso wie die dynamische, aber auch ebenso wie eine absolut energetische Wissenschaft unmöglich ist. Der Wahrheit letzter Schluss ist also bei keiner dieser drei zu finden, wenn sie absolut regieren wollen. Derjenige, welcher trotz KANT glaubt sich durchaus nur mit der sogenannten reinen Wahrheit zufrieden geben zu können und sich an ein absolutes und letztes Wissen als ewig feststehendes Fundament klammern will, würde sonach an der Physik verzweifeln müssen, da ihre letzten Grundelemente wieder ins Wissenschaos hinüberleiten. Aber dieses krampfhafte Streben nach Absolutem als Seligkeit des Wissenschaftlers dürfte überhaupt einen Denkfehler zur Grundlage haben, da das Erreichen des Zieles eines solchen Strebens gleichbedeutend mit dem Tode der Wissenschaft wäre. Wird einem Organismus die Möglichkeit zur Weiterentwickelung

abgeschnitten, so ist das gleichbedeutend mit einem Abschneiden der Lebensbedingungen. Daher wird derjenige, welcher sich bescheidet und auch die letzten Grundlagen der Wissenschaft als relativ oder zeitlich vergänglich, als „nur ein Gleichnis“ aufzufassen vermag, nicht der Beschränktere, sondern der Weiterblickende sein, der nicht wähnt auf einem unverrückbaren Fundament des Alls zu stehen, sondern nach allen Seiten in das Chaos hinein seinen Wissensbaum wachsen sieht, ohne den Tod durch Versteinerung der Wurzeln befürchten zu müssen. Ihm löst sich auch gleichzeitig die Disharmonie der kämpfenden Systeme, in der Physik der Dynamik, Kinetik und Energetik, in eine höhere Harmonie, indem er sie nicht als Gegensätze, sondern als gegenseitige Ergänzungen erkennen lernt, jedes System an seinem Platz und zu seiner Zeit die Wissenschaft befruchtend und ihre Entwickelung fördernd.

Zweiter Abschnitt.

Die Hülfsvorstellungen der Elektrophysik.

A. Allgemeines über die wissenschaftliche Bedeutung der Hülfsvorstellungen.

Vorbemerkung. Eine gesonderte Behandlung des Kapitels der Hülfsvorstellungen in einem Werk wissenschaftlichen Charakters könnte vielleicht manchen befremden. Wer jedoch eine kritische Sichtung der wissenschaftlichen Darstellungsweisen vornimmt, wird sich unschwer überzeugen können, dass das Bereich der Hülfsvorstellungen, und namentlich solcher mechanischer Natur, offen oder versteckt, entwickelt oder rückständig, fördernd oder hemmend viel weiter reicht, als es im ersten Augenblick erscheint. Durch deutliche Kennzeichnung der Bedeutung sowohl als der Grenzen dieses namentlich auch in der Elektrophysik vielfach verwendeten und zum Teil wohl unerlässlichen Gebietes der Hülfsvorstellungen dürfte daher weit mehr gedient sein, als durch möglichste Ignorierung desselben unter Vorschützung des „rein wissenschaftlichen“ Standpunktes. Die Einleitung zu diesem Abschnitt möge daher mit ihren allgemeinen Betrachtungen über den Charakter der Wissenschaft sowie die Stellung der Hülfsvorstellungen zur Wissenschaft gleichzeitig eine die Einleitung dieses Bandes ergänzende Begründung bieten, weshalb der Herausgeber dieselben nicht nur für Studierende, sondern auch ganz allgemein an dieser Stelle für angebracht hält.

44. Gedankenökonomische Grundlage jeder Wissenschaft.

Erfahrungsthatsachen sind es, welche die unerlässliche Grundlage aller Kenntnis ausmachen. Das persönliche Erlebnis von Wahrnehmungs- oder Erfahrungsthatsachen ist aber bei jedem einzelnen beschränkt. Bereits dieser Umstand macht es erforderlich, dass die Kenntnis eine weitere Ausbildung oder Ergänzung durch die Wissenschaft erfahre. Die Wissenschaft soll die Vermittelung von Erfahrungsthatsachen zwischen den einzelnen Individuen ermöglichen, wobei allerdings immer vorausgesetzt ist, dass dasjenige geistige Einzelwesen, welches mit Hülfe der Wissenschaft eine Sammlung von Erfahrungsthatsachen anlegen will, über eine hinreichende Anzahl selbsterlebter Erfahrungsthatsachen verfüge, welche mit den übrigen seiner Sammlung einzuverleibenden verwandt sind oder sich bis zu einem gewissen Grade mit ihnen decken. Diese Sammlung allein, möge sie sich auch noch so sehr der Vollständigkeit nähern, macht aber erst eine vollzähligere Kenntnis, jedoch noch keine Wissenschaft aus. Zu letzterer gehört vielmehr noch als wesentlicher Bestandteil ein Ordnungsprinzip. Das Erfordernis eines sol-

chen für die Orientierung ohne zu grossen Aufwand an Zeit und Mühe, ja zuweilen geradezu für die einzige Möglichkeit einer Orientierung, lässt sich am schnellsten auf Grund eines Analogieschlusses einsehen, wenn man auch hier auf die alltägliche Erfahrung eines jeden auf anderen Gebieten verweist. Wer würde z. B., um den Bewohner einer grossen Stadt aufzusuchen, sich auf das gewöhnlich nur in Märchen zum Ziele führende Suchen aufs Geradewohl oder von Haus zu Haus verlegen, und nicht das Adressbuch mit seinem hierfür bewährten Ordnungsprinzip zu Rate ziehen. Die alphabetische Buchstabenfolge in Verbindung mit der Namengebung der Personen, sowie ferner die Zahlenreihe in Verbindung mit Strassenbenennung und Numerierung der Häuser und Stockwerke u. s. w. ist hier das jedem geläufige Mittel zur Registrierung bezw. Auffindung des Individuums aus der grossen Sammlung. Obwohl auch hier die thatsächliche Bekanntschaft nur eine mehr oder weniger beschränkte ist, so ist doch die Möglichkeit der Erweiterung und zwar derjenigen nach bestimmter, ins Auge gefasster Richtung jederzeit gewährleistet, sofern sie nicht durch Abwesenheit von gemeinschaftlichen Berührungspunkten verhindert wird. Ausserdem ist durch das hier zur Anwendung gelangte Ordnungsprinzip in Verbindung mit der Benutzung statistischer Hülfsmittel auch die Möglichkeit gegeben, ohne Kenntnis der einzelnen Persönlichkeiten doch das Wissen über eine ganze Reihe von Eigenschaften eines Gemeinde- oder Staatswesens zu erlangen.

In vieler Beziehung ähnlich liegen nun auch die Verhältnisse bei der Wissenschaft im allgemeinen oder derjenigen eines bestimmten Gebietes im besonderen. Die Ausgestaltung einer möglichst brauchbaren, d. h. hier ökonomischen oder schnell zum Ziele führenden Ordnung der grossen und zunächst ungeordneten, d. h. einfach vorhandenen oder gegebenen Erfahrungsthatsachen ist das Ziel der Wissenschaft, und die ausgestaltete Ordnung die Wissenschaft selbst.

45. Ordnungsprinzip und Entwicklung der Physik

Dass das herangezogene Beispiel des täglichen Lebens nicht hinsichtlich des benutzten Ordnungsprinzips mit dem von der Wissenschaft benutzten übereinstimmt, ist ohne weiteres ersichtlich. Nicht äusserliche, sondern innerliche oder Wesensverwandtschaften sind es, welche dem Ordnungsprinzip der Wissenschaft zu Grunde liegen. Eher würde aus diesem Grunde das in der Physik benutzte Ordnungsprinzip mit den stammbaumartigen Einordnungen der Individualerscheinungen zu vergleichen sein, wie sie in der naturgeschichtlichen Descendenzlehre benutzt werden. Das letzte Ziel der nach Einheit strebenden Wissenschaftsordnung würde also der Anschluss sämtlicher Erfahrungsthatsachen an dieses organische Ader- oder Kanalsystem sein und die unzweideutige Festlegung der vielfach verdeckten Kanalstrecken (vgl. Einleitung), sowohl hinsichtlich ihrer Lage im Wissenschaftsorganismus als ihres Zusammenhanges bis zur schliesslichen Einmündung in den Sammelkanal für ein ganzes grösseres Wissenschaftsgebiet, oder auch noch weiter bis zur Einmündung in das alle Wissenschaftsgebiete verbindende Meer. Die Wissenschaft wird also die beiden scheinbar gegensätzlichen, aber sich gegenseitig ergänzenden Bestrebungen umfassen und vereinigen müssen: auf der einen Seite die gleichsam differenzierende und mit der Verfeinerung der Mess- und Beobachtungstechnik fortschreitende Herbeischaffung von Erfahrungsthatsachen als wissenschaftlicher Bausteine, oder im obigen Bilde gesprochen, als Aufdeckung immer feinerer Äderchen oder Kanalfäserchen: auf der anderen Seite die integrierende oder zusammenfassende Thätigkeit der

theoretischen Beherrschung, welche teils die Modifikation der bisher aufgestellten Baupläne bezw. Verbindungsschemata verlangt mit Rücksicht auf die erweiterte Kenntnis von Erfahrungsthatsachen, teils den weiteren Ausbau des Hauptplanes in Richtung der Einheitsbestrebung. Dass die letztere schliesslich doch trotz der scheinbar entgegenarbeitenden und verwirrenden Differenzierung Fortschritte macht, lehrt die Vergleichung des Wissenschaftsstandes an den Enden längerer Zeitabschnitte.

Wenn wir z. B. am Schluss des 19. Jahrhunderts die Zusammenfassung der noch um die Mitte desselben so gut wie völlig getrennten physikalischen Gebiete der Wärme, Licht, Elektrizität und Magnetismus durch die Erkenntnis der Wesensgleichheit aller Strahlungserscheinungen sichergestellt sehen, so entspricht dies der endgültigen Festlegung eines verdeckten Hauptsammelkanals. Oder wenn wir über das Gebiet der Physik hinausgreifend die Zusammenfassung aller Naturerscheinungen durch das Prinzip von der Erhaltung der Energie erfolgt sehen, so müssen wir von der Thatsächlichkeit der Auffindung eines meerartigen Sammelbeckens durchdrungen sein, welches einen ausserordentlichen Fortschritt nach Seite der Vereinheitlichung darstellt. Der Umstand, dass wir für die „Energie“ keine eigentlich befriedigende oder scharf umgrenzte Definition geben können, spricht nicht gegen diese Überzeugung, sondern eher dafür, dass wir uns dem wissenschaftlichen Urgrunde genähert haben, oder im obigen Bilde gesprochen, aus einem flussartig verlaufenden Kanal in ein weites Sammelbecken eingetreten sind. Wenn auch die Vorstellungen über die einzelnen Energieformen sich in Zukunft durch neue Erfahrungsthatsachen oder Experimente ändern können, soviel ist doch endgültig festgestellt, dass es etwas Ruhendes, d. h. Konstantes in der Erscheinungen Flucht giebt, das wir „Energie“ nennen können und das eine thatsächliche Beziehung oder eine wirkliche Verwandtschaft zwischen den verschiedensten Erscheinungen darstellt.

46. Beschreibung und Zurückführung auf Bekanntes als Aufgabe der Wissenschaft.

Dass diese Darstellung von dem Ziel der Wissenschaft sich mit der neuerdings immer mehr als richtig erkannten Auffassung deckt, wonach die Aufgabe der Wissenschaft in einer möglichst vollständigen Beschreibung der Thatsachen, gleichzeitig jedoch auf dem direktesten und einfachsten Wege, zu suchen sei, ist wohl ohne weitere Ausführung klar. Diese Auffassung schliesst die Kenntnis ein, dass alle sogenannten Erklärungen den Erscheinungen im Grunde nichts Neues hinzufügen, sondern sie nur auf alltägliche oder als bekannt vorausgesetzte einfachere Erfahrungsthatsachen mit Hülfe von Vergleichen, Analogieschlüssen und dergleichen zurückführen, häufig unter Benutzung der Mathematik oder Zählerfahrung. Diese Auflösung der komplizierteren Erfahrungsthatsachen in einfachere bezieht sich aber doch stets nur auf einen mehr oder weniger grossen Teil derselben; der zusätzliche, neu hinzutretende Rest, welcher das eigentliche Neue der Erfahrungsthatsache ausmacht, muss neu beschrieben werden, z. B. eben durch jene Formeln oder auf anderem Wege. Durch Zurückführung des überwiegenden Teiles auf bereits bekannte Beschreibungen wird aber die Darstellung am einfachsten und ökonomischsten.

Sollte diese Darstellung der Wissenschaft als eine Art Registrierkunst manchem anfänglich als eine Erniedrigung erscheinen, so wird er bei näherer Überlegung die ausserordentliche Bedeutung dieser Seite und die unerlässliche Notwendigkeit derselben für das Leben einsehen und die Ansicht einer

mit dieser Darstellung verbundenen Erniedrigung wohl verlieren. Ebenso hat sich bisher stets gezeigt, dass jeder Versuch über dieses Ziel hinausgehen zu wollen sich als verfehlt und für die Wissenschaft selbst geradezu als unheilvoll herausgestellt hat. Stets führt ein solches Vorgehen zunächst zu einem Loslösen derselben von den Erfahrungsthatsachen und schliesslich zu einem Widerspruch mit denselben, wodurch der geistige Tod der Richtung besiegelt wird. Die Wissenschaftsgeschichte hat namentlich auch auf dem Gebiete der Elektrophysik wiederholt gezeigt, dass jeder Versuch zur Umgehung des schrittweisen Aufbaues der Ordnung von unten auf, d. h. von der breitesten Grundlage der einzelnen Erfahrungsthatsachen auf Irrwege geleitet hat. Man braucht nur an Galvani und Volta zu erinnern (vgl. **9**), um zu erkennen, dass die Inangriffnahme weitsichtiger Probleme vor Lösung der nächstliegenden gewöhnlich verhängnisvoll zu werden pflegt, ein Grund, welcher die neuere Naturwissenschaft auch mit allen älteren philosophischen Systemen in Zwiespalt gebracht hat. Im Grunde ist das vorzeitige Festlegenwollen eines weitgehenden Zusammenhanges nichts als das Zurückfallen in den alten Fehler der dogmatischen Versteinerung, welcher vom Standpunkt der lebendigen Wissenschaft mit Recht bei vielen Glaubenssätzen der Kirche, mit welcher sie anfänglich vereint war, als Rückständigkeit bezw. Abirrung vom natürlichen Wege bezeichnet wird, wodurch die Möglichkeit einer gesunden vorwärtsschreitenden Entwickelung abgeschnitten ist.

Unter Voraussetzung des innigsten Kontaktes mit den Erfahrungsthatsachen wird die Wissenschaft zunächst eine gröbere Trennung der einzelnen Thatsachengebiete und, nachdem diese geistige Trennung vorgenommen, eine Auskrystallisation der einzelnen zunächst ungeordneten aber verwandten Erfahrungsteilchen aus der Mutterlauge aller beobachteten Erscheinungen anstreben. Dieses Bild des Auskrystallisierens drückt aber schon die Anordnung nach bestimmten Gesetzen, sowie das Ein- bezw. Anfügen neu hinzutretender Teilchen aus. Ein Hauptunterschied zwischen dem benutzten Bilde und der Wissenschaftsentwickelung besteht jedoch darin, dass das Krystallsystem von vornherein erfahrungsmässig gegeben, das zweckmässigste Wissenschaftssystem zwar auch vorhanden, aber erst aufgefunden werden muss. Umordnungen der Teilchen in kleinerem oder grösserem Masse sind also in letzterem Falle zur Erzielung besseren und einheitlicheren Zusammenstellens zeitweilig nötig und sind jederzeit durch Hinzutreten neuer Erfahrungsthatsachen zu gewärtigen.

Je neuer ein Wissenszweig ist im Verhältnis zu anderen Wissenszweigen, deren Erfahrungsthatsachen schon in höherem Grade Allgemeingut geworden sind, desto mehr wird er als in seiner Entwickelung noch weniger weit vorgeschritten, sich den Erfahrungsthatsachen der älteren, allgemeiner bekannten, bedienen müssen, um mit Hülfe von Vergleichen, Analogieschlüssen u. s. w. vorwärts zu kommen. Dieses Vorwärtskommen wird also in einer Übersichtserleichterung der Erscheinungen des neueren Gebietes bestehen und einen Schritt zur Ausgestaltung der angestrebten Ordnung darstellen, wenn diese auch noch nicht als die endgültige angesehen zu werden braucht.

47. Ziel und Mittel der Wissenschaft.

Unstreitig ist es der für die Wissenschaftstheorie idealste Standpunkt die Unzahl der möglichen Fälle durch eine Formel darstellen oder beschreiben zu können und jeden einzelnen dadurch auf die einfachste Weise registrier-

bar und rekonstruierbar zu machen. Für einzelne Gebiete ist dies auch bereits erreicht worden, wie z. B. bei den einzelnen Kreislaufgesetzen. Das Streben der Wissenschaft, hierin noch weiter zu kommen und etwa wie bei der MAXWELLschen Theorie Formeln zu finden, welche nicht nur das ganze Gebiet einer Wissenschaft, sondern mehrere umfassen, und so z. B. eine elektrisch-magnetisch-optische Universalformulierung zu erhalten, ist nicht nur selbstverständlich, sondern auch bis zu gewissem Grade erreicht. Dass diese Ausgestaltung der abstrakten und sich naturgemäss der analytischen Mathematik nach Möglichkeit bedienenden Wissenschaft aber für die angewandte oder technische Wissenschaft alle weiteren Hülfsmittel der Graphik und weiterhin der mechanischen Hülfsvorstellungen überflüssig mache, ist trotzdem nicht der Fall und wird auch voraussichtlich aus folgendem Grunde sobald nicht eintreten. Mag eine Erscheinungsgruppe oder auch eine grosse Anzahl solcher noch so vollständig aufgedeckt sein, so werden doch stets noch andere übrig bleiben, welche nicht völlig durchsichtig sind und eine volle Klarheit über alle Verbindungen jener Erscheinungsgruppen nicht zulassen; gegenwärtig sind dies z. B. alle als molekular bezeichneten Vorgänge, in denen eine zwischengeschaltete, mehr oder weniger klare Hülfsvorstellung enthalten ist. Die Notwendigkeit der Zwischenschaltung solcher Hülfsvorstellungen wird nun für die angewandte Wissenschaft aus rein praktischen Gründen noch lange bestehen bleiben. Gesetzt nämlich, man wäre so weit, wie es thatsächlich auch in beschränkteren Gebieten der Physik mehrfach schon der Fall ist, dass man zwischen den einzelnen Erscheinungsgruppen auf irgend welchen Umwegen eine analytisch formulierte Verbindung herstellen kann, auf der man von dem einen Punkt zum anderen gelangen kann, so wird doch der praktisch ausübende Wissenschaftler, der Techniker, vielfach den verwickelten und umständlichen Weg der exakten Wissenschaft aus rein praktischen Gründen nicht benutzen, sondern es der Ökonomie halber vorziehen eine zwischengeschaltete, wenn auch von der reinen Wissenschaft missliebig angesehene Hülfsvorstellung zu benutzen. Er wird dies um so eher thun, wenn die Hülfsvorstellung, etwa nach Art einer Springstange, ihn in den Stand setzt, direkt und schnell einen erstrebten Punkt jenseits eines analytisch nicht gangbaren, weil unaufgedeckten Zwischengebiets zu erreichen, anstatt einen weiten, zeitraubenden Umweg zur Umgehung jener Stelle anzutreten, wobei er sich einmal der Gefahr des Verirrens oder Abkommens von seinem Ziele, oder falls er es endlich erreicht, der Versäumnis des rechtzeitigen, durch praktische Verhältnisse bedingten Anschlusses aussetzt. Wenn erprobter Weise die Hülfsvorstellung diese praktische Hülfe sicher zu leisten vermag, so wird ihr praktischer Wert so lange vorhanden sein, als nicht die Erweiterung unserer Erfahrungsthatsachen eine direktere analytische Beziehung zwischen jenen zwei Punkten ermöglicht, welche das provisorische Zwischenglied der Hülfsvorstellung überflüssig macht. Andererseits kann sie natürlich jenen umständlichen analytischen Verbindungsweg nicht theoretisch überflüssig machen, sondern sie wird, wie so häufig, eine Ergänzung zu jenem bilden, wie sie zwischen reinem Wissen und wissenschaftlichem Glauben auf dem gesamten Wissenschaftsgebiet stets vorhanden sein wird, nur dass das zuverlässige Wissen stetig seine Grenzen auf Kosten des Glaubens vorrückt.

48. Analogien als wissen-

Eine Verkennung der Wichtigkeit, welche solche nicht völlig exakten Zwischenglieder bezw. Analogien als notwendige Ergänzung besitzen, wird

schaftliche Hülfsmittel.

aber stets einen schädlichen Rückschlag in der Entwickelung des Ganzen zur Folge haben. Dies lehrt die Geschichte der Naturwissenschaften unzweideutig; in der Elektrophysik braucht man hierbei nur einerseits an das Überwuchern des phantastischen Glaubens der sogenannten Naturphilosophie in den ersten Jahrzehnten des 19. Jahrhunderts zu denken, sowie andererseits an die darauf folgende Reaktion der sogenannten mathematischen Schule, welche die nichtmathematische Seite, gleichsam das materielle Moment, zu kurz kommen liess, indem das theoretisch-mathematische Knochengerüst eine einseitige Ausbildung erfuhr auf Kosten der praktisch-physikalischen Fleischteile. Aufgabe der Technik war es und bleibt es hier, die richtige Mitte zu halten.

Erkenntnistheoretisch ist die Thatsache weiterhin von Wichtigkeit, dass zur Beschreibung und Registrierung die zahlenmässige Formulierung zwar das wichtigste Hülfsmittel und daher das oberste Ziel ist, dass es aber durchaus nicht das alleinige sein kann, und dass es praktisch eine um so geringere Rolle spielen muss, je weniger weit bisher die Aufdeckung der Analogie zwischen den Gesetzen eines Erscheinungsgebietes und den Gesetzen der Zählerfahrung (Analytik) vorgeschritten ist. Ausser dieser wissenschaftlich wegen der Unverrückbarkeit der Zählerfahrung wichtigsten Analogie — denn nur um eine solche und nichts weiter handelt es sich im Grunde auch hier zwischen den Vollerscheinungen und den zugeordneten analytischen Formeln, welche dieselben in gewissen Beziehungen wiederspiegeln (vgl. **50**) oder auch „beherrschen", wie man sich nicht ganz richtig ausdrückt — bestehen aber noch andere Analogien zwischen jenen Vollerscheinungen und anderen Erfahrungsgebieten. Diese letzteren Analogien können praktisch für den einzelnen oder auch für ganze in bestimmter Weise vor- bezw. ausgebildete Gesellschaftsklassen von grossem Werte sein, ja mitunter von weit grösserem als jene rein mathematischen Analogien. Dieselben ignorieren oder als unwissenschaftlich auf die Seite schieben zu wollen, erscheint schon aus diesem Grunde ungerecht und einseitig, wenn auch vom Standpunkte der Analytik erklärlich. Als Beweis hierfür braucht wohl nur auf den bedeutenden praktischen Nutzen verwiesen zu werden, den die Technik neben der Verwendung der reinsten Mathematik in Gestalt der analytischen Formeln aus der vom Analytiker bereits als unrein scheel angesehenen Geometrie in Gestalt der graphischen Darstellungen bezw. Analogien zieht.

49. Abstufung der Analogien.

Fügt man nun zu den letzteren noch ein weiteres Element hinzu, d. h. zieht man die Analogien der Mechanik zur Klärung und geistigen Bewältigung anderer noch vielseitigerer und weniger aufgeklärter Erscheinungsgebiete, wie z. B. der elektrischen, heran, so entfernt man sich zwar noch weiter von den reinsten Analogien, gewinnt aber andererseits in entsprechendem Masse an Vollheit und Greifbarkeit und erreicht dadurch einen Vorteil für bestimmte Zwecke, welcher durch die zunehmende grössere wissenschaftliche Reinheit der vorerwähnten Analogien nicht ersetzbar ist. Diese Analogien, welche in Gestalt von Hülfsvorstellungen auftreten und mehr oder weniger weit reichen, werden also einen immer spezielleren und im allgemeinen veränderlichen, dafür aber mitunter viel intensiveren Wert für den einzelnen besitzen als die vorausgegangenen. Das allen gemeinsame Prinzip der Vergleichung wird den wissenschaftlichen Charakter ausmachen. Dass diese Betrachtung über die Reihenfolge der Analogien noch eine weitere

Fortsetzung über die Mechanik hinaus zulässt und alsdann zu Analogien zwischen beliebigen Erfahrungsgebieten oder auch zwischen verschiedenen Gruppen desselben Erscheinungsgebietes führt, bedarf wohl nur der Andeutung. Als Beispiel für den letzteren Fall würde die Analogie zwischen den verschiedenen Kreislaufgesetzen (vgl. **68**, sowie H. I, 2) zu gelten haben. Da alle derartigen Analogien zwischen verschiedenen Erscheinungsgebieten naturgemäss nicht bis zur vollständigen Deckung gehen können, weil sonst die thatsächlich beobachtete Verschiedenheit nicht bestehen würde, so besitzt bei Verwendung des wissenschaftlich so wichtigen Vergleichungprinzips die Frage bezw. die Feststellung der Grenzen der benutzten Analogie die allergrösste Wichtigkeit.

50. Wertung und Grenzen der Analogien.

Im allgemeinen wird der wissenschaftliche Wert einer Analogie um so höher geschätzt, je weitergehend dieselbe ist, d. h. je später man auf die Grenzen der Gültigkeit stösst. Dies ist auch der Grund warum die reine Zählanalogie, d. h. die analytische Formulierung eines Erscheinungsgebietes wissenschaftlich am höchsten geschätzt wird, weil hier die Gültigkeitsgrenzen am weitesten hinausgeschoben sind und zwar häufig so weit, dass dieselben, vorläufig wenigstens, meist garnicht als Beschränkung oder als Grenzen empfunden werden. Dass trotzdem auch hier solche vorhanden sind oder wenigstens sein können, darauf sind weniger vorsichtige Mathematiker und theoretische Physiker von E. Mach („Prinzipien der Wärmelehre") aufmerksam gemacht worden, durch den Hinweis, dass alle Eigenschaften, welche die Zahlen, d. h. die Elemente der analytischen Analogie aufweisen, wie z. B. ihre unbegrenzte Teilbarkeit, d. h. ihre Kontinuitätseigenschaft, nicht notwendigerweise auch die physikalischen Elemente der Vollerscheinungen zu besitzen brauchen. Die Annahme eines physikalischen Kontinuums würde z. B. mit der Atom- und Molekülvorstellung in einem Widerspruch stehn, ebenso wie andere physikalische Grössen, z. B. Wärmemenge, Elektrizitätsmenge, Temperatur, elektrische Spannung u. s. w., welche uns vorläufig als Kontinuum erscheinen, möglicherweise aber (vgl. **79**) an gewisse Stufenwerte gebunden sind; bei der Molekülvorstellung ist dies sogar eine unabweisbare Notwendigkeit. Hier würde alsdann auch eine Grenze der Analogie zwischen den analytischen Formeln und den umfassenderen Vollerscheinungen der Physik bestehen. Sollte diese Analogiegrenze bestimmt nachweisbar werden, so würde dies den Beweis liefern, dass bei den analytisch formulierten Gesetzen auch kein völliges Überdecken oder keine völlige Lösung der einfacheren, ein-elementaren Zahlenbeziehung durch das kompliziertere, mehr-elementare Erscheinungsgebiet stattfindet, sondern dass die nur den Zahlen innewohnenden Eigenschaften ein Herausragen des analytischen Gebietes aus dem physikalischen bezw. einen unlösbaren Rest oder, was dasselbe sagt, eine Grenze der Analogie beweisen würden.

Je komplizierter hinsichtlich der Anzahl der physikalischen Dimensionen oder Elemente das zur Vergleichung (Analogie) herangezogene Thatsachengebiet ist, um so geringer wird im allgemeinen die verhältnismässige oder prozentuelle Überdeckung der verglichenen Erscheinungsgruppen beider Gebiete sein, d. h. um so mehr einseitige Eigenschaften wird das Vergleichungsgebiet aufweisen, und um so früher kann die Analogiegrenze erreicht sein. Trotzdem wird, wie schon oben ausgeführt, der praktische Nutzen für den Einzelnen auch bei Analogie mit beschränkteren Gültigkeitsgrenzen oder richtiger prozentueller Überdeckung, bezogen auf das

(als Normale benutzte) Vergleichsgebiet, ein grosser sein können, wegen der grösseren Greifbarkeit, d. h. des grösseren aboluten Wertes der Überdeckung. Geometrisch ausgedrückt würde das gegenseitige Verhältnis sich etwa wie folgt darstellen: Die Vollerscheinungen entsprechen dem Raum oder erfüllen einen Teil desselben vollständig, die analytischen Analogien der Erscheinungen entsprechen feinen, weit im Raume verzweigten Aderlinien mit einem vielen Raumteilen bezw. Erscheinungen gemeinschaftlichen Verlauf; die letztgenannten Analogien stellen hingegen in gleicher Weise wiederkehrende kleinere Partien von flächenförmiger oder körperlicher Ausdehnung dar.

51. Prinzip der Vergleichung als Charakter der Wissenschaftlichkeit.

Bei richtiger Beachtung und Einhaltung der Analogiegrenzen besteht sonach nur ein gradueller aber kein wesentlicher Unterschied in den aus gedankenökonomischen Gründen zur Vergleichung herangezogenen Hülfsmitteln. Neben der Verwendung der mathematischen Hülfsmittel in Gestalt der wissenschaftlich zu höchst stehenden analytischen Formulierung, sowie der demnächst folgenden geometrischen, das ist graphischen Darstellung, wird auch die Benutzung der mehr physikalischen Vergleichsmomente, in erster Linie der mechanischen Hülfsvorstellungen, in zweiter, der überhaupt Vergleichspunkte darbietenden Erscheinungsgruppen, Wert besitzen. Namentlich in Gebieten mit noch nicht sehr weit reichender Aufdeckung der thatsächlichen Beziehungen, sowie als gedankliches Mittelglied zur Verbindung verschiedener solcher Gebiete können mechanische Hülfsvorstellungen sowohl aufklärend wirken, als auch die schnellere Verständigung bei Behandlung dieses Gegenstandes ermöglichen, d. h. die Beschreibung der Erscheinungen sehr vereinfachen. Als Beispiel sei hier auf die zum Teil noch wenig eingehend untersuchten dielektrischen Erscheinungen hingewiesen, welche durch Benutzung der später behandelten mechanischen Hülfsvorstellungen sehr viel leichter übersehbar werden und eine für die Rekonstruktion bestimmter Spezialfälle und Kombinationen wertvolle Handhabe bieten; die Zahl der im Gedächtnis zu merkenden Vergleichsthatsachen ist beim mechanischen Hülfsmodell nämlich erstens eine sehr kleine und zweitens bei dem üblichen Gang der Erfahrung bereits bekannt, weil auf die mechanischen Grunderscheinungen, wie Reibung, Elastizität, Trägheit, zurückgeführt. Die Vorstellung einer analogen Reibungs-, Elastizitäts- und Trägheitserscheinung auf elektromagnetischem Gebiete wird daher vielfach die Gedankenarbeit bei Bewältigung bezw. Übersicht der elektromagnetischen Erscheinungen vereinfachen und dadurch ökonomisch wirken können, ohne dass es notwendig ist, dass die elektrischen Erscheinungen in den Einzelheiten den mechanischen entsprechen; das wesentliche bleibt zunächst die Analogie in den Hauptbeziehungen. Thatsächlich lässt sich die Analogie nutzbringend ziemlich weit durchführen, ohne auf die — natürlich zu beachtenden — Grenzen zu stossen. Innerhalb dieser Grenzen wird die Benutzung dieser Hülfsvorstellungen aber für viele einen grossen und durch andere Hülfsmittel vorläufig unersetzbaren Vorteil gedankenökonomischer Art darbieten. Dass derselbe mehr individueller Natur ist als der Vorteil rein mathematischer Hülfsmittel kann und soll nicht in Abrede gestellt werden.

Die mit Vergleichen und Analogieschlüssen arbeitenden mechanischen Hülfsvorstellungen für die elektromagnetischen Erscheinungen wollen also keine eigentliche Erklärung geben, was nach dem obigen überhaupt nicht möglich ist, denn selbst der sogenannte Causal-Nexus ist im Grunde genommen

nichts weiter als der gewohnheitsmässige gedankliche Schluss auf Grund wiederholter Erfahrung, teils persönlicher, teils traditioneller; sie wollen vielmehr bei allen denen, welche die mechanischen Erfahrungen bereits geordnet besitzen, die Vermittelung zu einer leichteren Erlangung der Übersicht und Ordnung der Erfahrungen auf elektromagnetischem Gebiete übernehmen. Wer den Wert und die Bedeutung der Vergleichung auf wissenschaftlichem Gebiete in ihrem vollen Umfange erkannt hat, wird auch die Wichtigkeit solcher Zwischenglieder nicht verkennen.

52. Praktischer Wert der Hülfsvorstellungen.

Für viele, namentlich mehr praktisch veranlagte Naturen sind Hülfsvorstellungen geradezu unerlässlich um ihren geistigen Horizont über das ihnen zunächst liegende Gebiet hinaus erweitern zu können. Das letztere hängt zum Teil mit dem Verhältnis von Begriff und Vorstellung zusammen, auf das hier zur Klärung mit einigen Worten hingewiesen sei. Obwohl die ursprüngliche Bedeutung von Begriff wohl sogleich eine Vorstellung eingeschlossen hat, welche durch das für den Begriff gewählte Symbol oder Wort ausgelöst werden sollte, so kann dies bei der neueren Entwickelung der Wissenschaftszweige immer weniger als Regel gelten. Auf elektromagnetischem Gebiete erkennt man diese ursprüngliche Vereinigung von Begriff und Vorstellung noch deutlich in den von früher übernommenen Bezeichnungen, z. B. Stromstärke. Hier ist auch die Definition so gefasst, dass sie bei jedem, er mag wollen oder nicht, eine bestimmte Vorstellung auslöst, welche noch auf die ursprünglichen Fluidumsvorstellungen zurückzuführen ist. In ähnlicher Weise wird der aufrichtig Prüfende auch bei allen anderen Begriffen das direkte Verknüpftsein oder — im Untergrunde wenigstens — Nebenherlaufen einer Vorstellung entdecken, welche als mehr oder weniger versteckte, manchmal kaum bewusste mechanische Analogie- oder Hülfsvorstellung anzusehen ist. Dass dieses bei allen älteren Begriffen der Elektrizitätslehre bestehende Verhältnis zur Vorstellung bei der Weiterentwickelung und namentlich bei ihrer Vereinigung mit der Lehre vom Magnetismus nicht beibehalten blieb, lag nicht etwa in dem nunmehrigen Wegfall einer gewissen geistigen Notwendigkeit des Zusammengehens von Begriff und Vorstellung, sondern vielmehr im Versagen der älteren Hülfsvorstellungen (Fluidumsvorstellungen) gegenüber den erweiterten Erfahrungsthatsachen. Die nächste Folge war, dass die weiterhin eingeführten Begriffe, wie z. B. Selbstinduktionskoeffizient, die Begleitung jeder bestimmten Vorstellung erschwerten und ein der Anschaulichkeit entbehrendes Definitionsdasein führten. Dank der genauen Definierbarkeit durch Worte bezw. Symbole bildete dieser Vorstellungsmangel dem Theoretiker nur wenig Schwierigkeiten, da er leichter als der Praktiker in der Lage ist, die Verwendung direkter Vorstellungen auf mathematischem Wege zu umgehen beziehungsweise durch die Definition zu ersetzen. Wer aber, wie z. B. häufig der Studierende und der Praktiker, weniger Gewandtheit in dem Durchlaufen völlig abstrakter und verwickelter Gedankengänge besitzt, der wird ohne Vorstellung nicht gut auskommen; andernfalls besteht die Gefahr der verständnislosen Anwendung mechanisch eingelernter Beziehungen ohne jedes tiefere Verständnis. Es muss daher bei der hierauf folgenden wissenschaftlichen Richtung als ein wohl erklärlicher, aber vom praktischen Standpunkte aus doch schwerer Fehler angesehen werden, dass wegen des Unzulänglichwerdens einer älteren Vorstellung das Überbordwerfen der ganzen Vorstellung, ja Leugnung des Nutzens von Hülfsvorstellungen überhaupt erfolgte. Hierin lag die Verkennung eines Bedürf-

nisses des menschlichen Geistes bei seiner Entwickelung, die sich später und auch jetzt noch durch Abneigung weiter Kreise gegen abstrakte Theoretisierungen rächte. Die Definition erlaubt zwar durch Zurückgehen auf Erfahrungs- oder noch besser Wahrnehmungsthatsachen, welche als allgemeiner bekannt vorauszusetzen sind, eine Auflösung der schwierigeren Begriffe in Elementarbegriffe, aber dieses indirekte Verfahren ist für das schnelle Überblicken, wie es der Praktiker meist benötigt, in hohem Grade hinderlich, ja dasselbe manchmal geradezu ausschliessend. Für solches direkte Verfahren bilden die mit den Begriffen untrennbar verbundenen Hülfsvorstellungen ein unbedingt notwendiges Zwischen- oder Durchgangsglied. Sie treten, entweder unbewusst und ungeklärt im Untergrunde des Begriffes vorhanden oder bewusst nebenhergehend, bei der menschlichen Wissenschaft zwischen die Erscheinungen einerseits und die formelmässige bezw. abstrakt mathematische Behandlung derselben andererseits.

53. Theorie und Hülfsvorstellung.

Der Begriff Theorie bedarf ferner einer gewissen näheren Deutung, da auch er eine gewisse Entwickelung durchgemacht hat. So spricht man z. B. mitunter noch unter Beibehaltung der früheren Bezeichnung als „Theorie“ von der sogenannten Fluidumstheorie, eine Auffassung, die wir heute besser unter die Hülfsvorstellungen zählen, während „Theorie“ sich gegenwärtig immer mehr auf mathematische Formulierungen beschränkt, sodass man unter MAXWELLs Theorie nicht die anfänglich ihm als Ausgangspunkt dienenden Hülfsvorstellungen versteht, sondern erst die mathematischen Ableitungen von den die Thatsachen beschreibenden Grundgleichungen an. Hiernach würde im heutigen, engeren Sinne „Theorie“ die mathematische und besonders analytische Analogie darstellen, welche von möglichst wenig fundamentalen und als thatsächlich gegeben anzusehenden Beziehungen ausgehend eine rein mathematische Entwickelung gestattet, jedoch von der Beschaffenheit, dass die abgeleiteten Beziehungen den Erfahrungsthatsachen entsprechen, d. h. mit dem analytisch formulierten Einzelgesetze jenes Gebietes übereinstimmen, und dieselben gleichzeitig zusammenfassen. Der Wert einer Theorie wird, abgesehen von ihrem heuristischen Wert als Arbeitshypothese (vgl. **55**), sonach um so grösser sein, je weniger Grundgesetze bezw. -gleichungen als gegeben erforderlich sind, je grösser der Umfang der Erscheinungsgebiete ist, welche sie umfasst, und je besser sich alle ihre Ableitungen mit Erfahrungsthatsachen belegen lassen, beziehungsweise sich denselben anschmiegen.

Die Voraussetzungen, welche für die Verwendung dieser Analogie gemacht werden, sind also ausser den fundamentalen Ausgangsbeziehungen rein mathematischer Natur, und alle gedanklichen Ergebnisse mit Hülfe dieser Zahlenanalogie folgen durch das Einspringen in die mathematische Bahn aus dem Thatsachengebiet an einer bestimmten Stelle, Durchlaufen des mathematischen Bahnnetzes bis zu dem erstrebten Punkte und Herausspringen bei letzterem aus jener Bahn wiederum in das Thatsachengebiet: eine zweimalige Umsetzung, die gleichsam eine Gedankenübertragung mit Hülfe der Mathematik darstellt. Hierzu bedarf es eines hinreichend sicheren Funktionierens aller drei Übertragungselemente, um praktisch brauchbare Ergebnisse, beziehungsweise einen wirtschaftlichen Betrieb zu ermöglichen. Ist eines derselben, z. B. der Apparat zum Eintritt aus den Thatsachen in die Sprache der Mathematik, etwa in Gestalt des Ansatzes von Differentialgleichungen, oder die der Leitfähigkeit entsprechende Geläufigkeit der Behandlung mathe-

matischer Formulierungen, oder endlich der Apparat zum Rücktritt aus den mathematischen Ergebnissen in die Vollerscheinungen nicht gut und richtig funktionierend, so ist die Rationalität der praktischen Benutzung in Frage gestellt. Eine Verwertung dieses Hülfsmittels von seiten des praktisch thätigen Ingenieurs setzt also sowohl hinreichende Kenntnis der Vollerscheinungen als auch Übung im Gebrauch des mathematischen Werkzeuges voraus, um wirtschaftlich sein zu können.

Aber auch dann wird diese Form der Übertragung nicht als Universalhülfsmittel anzusehen sein, und es lassen sich sehr wohl Fälle denken, wo eine andere geistige Übertragungsform rationeller ist. Ähnlich wie in der Elektrotechnik die Systemfrage von Fall zu Fall zu entscheiden ist und nicht stets hochgespannter Wechselstrom allein in Frage kommt, so wird auch hier vielfach eine graphische Behandlung oder die Benutzung anderer Analogien, z. B. in Gestalt von mechanischen (über eine elektrische vgl. **147** in H. I, 2) Hülfsvorstellungen gedankenökonomischer sein können, namentlich wenn man ausser dem Zwecke auch noch die Vorbildung und geistige Schulung in Betracht zieht.

Als Hülfsvorstellung würden also alle anderen benutzten Analogien nicht rein mathematischer Natur zu bezeichnen sein, welche von meist beschränkterer Gültigkeit doch mit den mathematischen Analogien das wissenschaftliche Moment gemein haben, welches in dem Prinzip der Vergleichung liegt, dem ältesten und universellsten Hülfsmittel, um neuere und weniger bekannte Thatsachengebiete mit älteren und bekannteren in Verbindung zu bringen, beziehungsweise die neueren so weit als möglich auf die älteren zurückzuführen. Der sich bei beiden nicht deckende Rest würde die neue, das Gedächtnis belastende Erscheinungsseite des jüngeren, bezw. komplizierteren Gebietes darstellen, wobei „älter“ und „jünger“ naturgemäss relative Begriffe sind, die sich sowohl auf die wissenschaftliche Entwickelung der Gebiete selbst, als auch des heranwachsenden geistigen Individuums beziehen können. Dass unter Umständen bei letzterem eine gewisse Umkehrung in der Entwickelung und damit in den Haupt- und Hülfswissenschaften möglich ist, bei ursprünglich mehr empirischer (praktischer) Ausbildung und erst später nachfolgender theoretischer und besonders mathematischer, ist hiernach leicht vorstellbar. Bis zu gewissem Grade ist dies wohl bei jedem praktisch oder experimentell Arbeitenden vorhanden, insofern sich zuweilen das vollere Verständnis mancher mathematischen Begriffe oder überhaupt von Begriffen mehr abstrakter Natur — z. B. desjenigen der Funktion — erst rückwärts aus der Beobachtung des Zusammenhanges der Vollerscheinungen entwickelt.

Nach dem Vorausgegangenen wird der individuelle Wert solcher Hülfsvorstellungen, abgesehen von dem Entwickelungsstadium des Wissenschaftsgebietes selbst, von dem jeweiligen geistigen Entwickelungszustande des Wissenschaftsjüngers abhängig sein. Für den abstrakt mathematischen Theoretiker kann er z. B. verhältnismässig rasch abnehmen, wird hingegen für den Lernenden von höchster Wichtigkeit sein und auch für den Praktiker durch Unterstützung des Gefühls von Wichtigkeit bleiben. Dass der praktische Nutzen für sehr viele Fälle vorhanden ist, liesse sich zur Genüge nachweisen, sei hier aber nur durch den Hinweis auf die Benutzung ähnlicher Hülfsvorstellungen, nämlich derjenigen der Moleküle und Atome auf anderen Gebieten festgestellt. Hat man aber durch solche Überlegung die Notwendigkeit der

Verkettung von praktisch wichtigen Begriffen mit innerlichen Vorstellungen eingesehen, so ist es doch offenbar besser, einen geklärten und deutlich als Hülfsvorstellung erkannten Untergrund bei den Denkprozessen zu besitzen, als eine absichtlich ungeklärte und nicht offen zugestandene Verwendung dieses unerlässlichen Hülfsmittels zuzulassen. Ein wissenschaftlicher Gegensatz zwischen Hülfsvorstellung und Theorie lässt sich aus verschiedenen Gründen nicht konstruieren; als Beleg braucht man nur auf Faraday und Maxwell zu verweisen, die Begründer der neueren Hülfsvorstellungen. Allerdings muss, wie bereits (**51**) erwähnt, zugestanden werden, dass solche Hülfsvorstellungen vielfach in dem Sinne keine allgemeine Bedeutung besitzen, als sie je nach Vorbildung und Entwickelung jedes einzelnen einer gewissen Anpassung bedürfen. Dieser mehr subjektive Wert derselben ist aber kein Nachteil, sondern für dieselben charakteristisch und wird andererseits für den einzelnen, welcher das Seinige dazu thut, um so grösser sein. In der Entwickelung der ganzen Wissenschaft sowohl als des Individuums, wird ihr Wert also einmal einer zeitlichen Änderung unterliegen, ein zweites Mal von ihrer Anpassung an die Vorbildung, d. h. von den vorausgegangenen Erfahrungsthatsachen des einzelnen abhängen. Bei technischer oder physikalischer Vorbildung werden sie naturgemäss ihren Schwerpunkt in mechanischen Bildern, Analogien, Modellen haben, wobei aber im Detail jeder seine Erfahrungswelt mit verwerten kann und wird.

54. Thatsachen und Vorstellungen. Atomistik.

Dass man natürlich hierbei nicht in den Fehler verfallen darf, diese Hülfsvorstellungen mit dem Thatsächlichen so zu vermengen, dass die Grenze zwischen beiden vielfach verdeckt wird — ein z. B. bei der Atomvorstellung öfters begangener Fehler — darauf hat schon Faraday ausdrücklich hingewiesen, der wie auf vielen anderen Gebieten, so auch hier ein Bahnbrecher war und grundlegend für die moderne Auffassung wirkte. Seine Ausführungen über Atomvorstellung können noch heute Interesse beanspruchen, wenn er in dem Aufsatze: „Eine spekulative Betrachtung über elektrische Leitung und über die Natur der Materie“ (vgl. Exp. Res., Bd. II, 256) im Jahre 1844 sagt:

Die, wie ich glaube, jetzt vorhandene Ansicht von der atomistischen Konstitution der Materie, ist die, welche das Atom als etwas Materielles von einem gewissen Volumen ansieht, dem von allem Anfange an die Kräfte eingepflanzt seien, vermöge welcher, wenn viele Atome in Gruppen zusammentreten, die verschiedenen Substanzen gebildet werden, deren Wirkungen und Eigenschaften wir beobachten. Diese Atome, obschon sie durch ihre eigenen Kräfte gruppiert und zusammengehalten werden, berühren einander nicht, sondern haben Raum zwischen sich, da sich sonst ein Körper nicht durch Druck oder Abkühlung zu einem kleineren Volumen zusammenziehen oder durch Wärme und Spannung zu einem grösseren ausdehnen könnte. In Flüssigkeiten sind diese Atome oder Partikelchen frei beweglich um einander, in Dämpfen oder Gasen stehen sie zwar auch durch ihre Kräfte in Beziehung zu einander, aber ihr Abstand von einander ist grösser.

Die Atomtheorie wird in unserer Zeit auf diese oder jene Weise vielfach angewandt, namentlich zur Erklärung der Erscheinungen der Krystallisation und der Chemie, aber man unterscheidet sie nicht mit solcher Sorgfalt von Thatsachen, dass sie nicht dem Lernenden als ein Ausdruck der Thatsachen selbst erscheint, wiewohl sie im besten Fall nur eine Hypothese ist, deren Wahrheit wir nicht darthun können, was wir auch von ihrer Wahrscheinlichkeit sagen oder denken mögen. Mit dem Worte Atom, welches niemals gebraucht werden kann, ohne viel gänzlich Hypothetisches in sich zu schliessen, beabsichtigt man oft, eine einfache Thatsache auszudrücken, aber so gut auch die Absicht sein mag, so habe ich doch noch Niemanden gefunden, der dasselbe von den es begleitenden verführerischen Vorstellungen frei zu halten vermocht hätte, und es unterliegt wohl keinem Zweifel, dass Ausdrücke wie feste Proportionen, Äquivalente, Urbestandteile u. s. w., welche alle Thatsachen der sogenannten Atomtheorie in der Chemie vollständig aus-

drückten und auch jetzt noch ausdrücken, deshalb aufgegeben wurden, weil sie nicht bezeichnend genug waren, um alles das auszusagen, was derjenige, welcher das Wort Atom gebrauchte, sich dabei dachte; sie drückten nicht sowohl die Hypothese als die Thatsache aus.

Allein es ist immer sicher und philosophisch, Thatsachen von Theorie soviel als möglich zu unterscheiden; die Erfahrungen vergangener Zeiten lehren uns genügend die Weisheit eines solchen Vorgehens, und wenn man bedenkt, dass der Geist die Neigung hat, sich bei einer Annahme zu beruhigen und, wenn sie den augenblicklichen Zwecken genügt, zu vergessen, dass sie eben eine Annahme sei, so sollten wir dessen eingedenk sein, dass sie in solchen Fällen zu einem Vorurteil wird und unvermeidlich die Klarheit des Urteils mehr oder weniger trübt. Ich bezweifle, ob jemand, der als geschickter Theoretiker besonders befähigt ist, in die Geheimnisse der Natur zu dringen und die Art ihrer Thätigkeit durch Hypothesen zu erraten, auch, um zugleich sein eigenes und anderer Fortschreiten zu einem zuverlässigen zu machen, besonders vorsichtig sein wird, das Wissen, welches aus Annahmen besteht, womit ich Theorie und Hypothese meine, von dem Wissen, welches Thatsachen und Gesetze umfasst, zu unterscheiden, ob er weder je die ersteren zu der Würde oder dem Ansehen der letzteren erheben, noch die letzteren mehr als es unvermeidlich ist mit den ersteren verwechseln wird.

Diese Stellen dürften ebensowohl auf die Naturnotwendigkeit der Benutzung solcher Hülfsvorstellungen in gewissen Entwickelungsstadien einer Wissenschaft und für bestimmte Zwecke, als auf ihre Gefahren bei lässigem und unklarem, d. h. unkritischem Gebrauch derselben hinweisen.

Bei der Wichtigkeit dieser Frage für die Wissenschaft möge auch die Ansicht eines modernen Forschers, eines Vorkämpfers der Energetik, über die Atomfrage hier angefügt sein. Es ist dies folgende Auslassung OSTWALDS über die kinetische Gastheorie (vgl. OSTWALD, Kap. XVI, 20, 890):

Die fragliche Anschauung kommt bekanntlich im wesentlichen darauf hinaus, dass die Gase aus kleinsten Teilchen oder Molekeln bestehend angenommen werden, welche sich alle in sehr schneller und heftiger Bewegung befinden, und durch ihr Aufprallen an die Gefässwände die Druckerscheinung bewirken. Es lässt sich leicht nachweisen, dass ein solches mechanisches Gebilde manches von den Eigenschaften eines Gases besitzen muss. So verhält sich insbesondere der Druck umgekehrt wie der eingenommene Raum, und macht man die weitere Voraussetzung, dass die Temperatur eines Gases der lebendigen Kraft der Molekeln proportional sei, so ergeben sich auch die allgemeinen Gesetze bezüglich der Wärmeausdehnung der Gase.

Auf die Schwierigkeiten und Widersprüche, in welche sich diese Hypothese an anderen Stellen verwickelt hat, soll hier nicht eingegangen werden, sondern auf eine weitere, von MAXWELL zuerst durchgeführte Schlussfolgerung, dass in einem solchen Gebilde die Geschwindigkeiten der Molekeln nicht untereinander gleich sein können, sondern zwischen Null und Unendlich alle möglichen Werte nach einem bestimmten Gesetze haben müssen. Diese Ansicht half in glücklicher Weise über eine allgemeine Schwierigkeit hinaus, in welche die früher in der Chemie benutzten Hypothesen über die Natur der chemischen Verbindungen geführt hatten. Diese älteren Hypothesen fassten den Bestand einer chemischen Verbindung als den eines mechanischen, von Kräften zusammengehaltenen Gebildes auf, und die chemische Zersetzung war ihnen die Überwindung der kleineren, zwischen den Bestandteilen der Verbindung bestehenden Kraft durch die grössere des hinzugesetzten Stoffes gegenüber eines der Bestandteile. Diese Ansicht verlangte ausschliessliche Reaktionen; lag eine Verbindung AB vor und hatte ein hinzukommender Stoff C zu A eine grössere Anziehung, als sie zwischen A und B bestand, so wurde die Verbindung unweigerlich vollständig zersetzt und die neuere AC ebenso vollständig gebildet.

In dieser Vorstellung war kein Raum für die Thatsache, dass alle solche Zersetzungen immer nur teilweise erfolgen. Obwohl bereits am Ende des vorigen Jahrhunderts BERTHOLLET das allgemeine Gesetz erkannt hatte, dass alle chemischen Vorgänge nur unvollständig sind, und dass das chemische Gleichgewicht, das unveränderte Nebeneinanderbestehen gewisser Mengen der ursprünglichen Stoffe und der Produkte ihrer Wechselwirkung nebeneinander, der normale Fall des chemischen Prozesses ist, so hatte sich

doch, wesentlich zu Gunsten der herrschenden Anziehungshypothese (welcher übrigens auch BERTHOLLET merkwürdiger Weise anhing), ein so energischer Widerspruch gegen die Anerkennung dieser Thatsachen erhoben, dass die wissenschaftliche Welt mit Vergnügen die Gelegenheit benutzte, welche ihr einige von BERTHOLLET gemachte Fehler gaben, das unwillkommene Kind mit dem Bade auszuschütten, um sich von diesem den Besitz jener Hypothese nicht rauben zu lassen.

Es ist kein erhebendes Zeugnis für die Beschaffenheit des menschlichen und insbesondere des wissenschaftlichen Geistes, dass die Beseitigung jener unzulänglichen Anziehungshypothesen nicht eher gelang, als bis für das verloren gegangene Spielzeug ein neues, ebenso hypothetisches geboten werden konnte. Durch jene von MAXWELL ausgesprochene Konsequenz der kinetischen Hypothese besann man sich endlich auf die längst bekannten Thatsachen der unvollständigen Vorgänge, und nachdem man ihre Berechtigung sich durch die hypothetische Passkarte gesichert hatte, wurden unter deren Garantie denn auch endlich die revolutionären Thatsachen zugelassen, welche bis dahin sorgfältig sekretiert oder diskreditiert worden waren. Die Verschiedenheit in den Bewegungszuständen der Molekeln machte die Möglichkeit teilweiser Reaktionen „verständlich“, und verschaffte ihnen die Beachtung, welche sie unter dem alten Regiment der reinen Anziehungslehren nicht hatten gewinnen können.

Das wesentliche Verdienst, welches die kinetische Hypothese sich erworben hat, ist also die Befreiung der Geister von jenem nicht durch die Thatsachen, sondern durch das Bedürfnis ihrer Schematisierung entstandenen Vorurteil. Zwar war diese Hülfe nicht ganz wohlfeil erkauft, denn an die Stelle des verworfenen Bildes trat ein anderes, welches die Thatsachen allerdings in dem eben erwähnten Zuge getreuer darstellte, als das frühere, welches aber auch seinerseits nicht verfehlte, eine ähnliche Scheuklappenwirkung auf die weitere Entwickelung der Wissenschaft zu äussern, wie jenes ältere Bild. Für diese hypothetischen Bilder, auf welche bis heute noch insbesondere die Chemie einen unverhältnismässigen Wert legt, lässt sich die Umkehrung des tiefsinnigen Wortes anwenden: alles Vergängliche ist nur ein Gleichnis. — In der That lehrt die Geschichte der menschlichen Erkenntnis immer wieder, dass alles Gleichnis nur vergänglich ist, dass insbesondere alle anschaulichen Hypothesen damit enden, dass sie falsche Anschauungen geben. Hat man ein Bild aus einem geläufigen Anschauungskreise gefunden, welches die vorliegenden Thatsachen in deutlicher Gestalt zu schildern gestattet, so ist für die Verbreitung und die Kenntnisnahme der so geschilderten Verhältnisse allerdings eine grosse Bequemlichkeit erlangt. Aber mit unwiderstehlicher Gewalt setzt sich in kurzer Frist das Bild an die Stelle der Thatsachen, und wenn es mit der erweiterten Kenntnis dieser nicht mehr stimmen will, so beginnen wissenschaftliche Kämpfe zwischen denen, die ein neues Bild an die Stelle des alten setzen wollen, und den Anhängern der alten Veranschaulichung, welche solche Mengen von Zeit und Kraft in Anspruch nehmen, dass immer wieder die Frage aufgeworfen werden muss, ob der vorübergehende Gewinn der leichteren Lehre und Veranschaulichung nicht viel zu teuer durch die Schwierigkeiten des Hinwegräumens eben derselben Vorstellung bezahlt wird, wenn sie im Laufe der Zeit das unausweichliche Geschick des Veraltens und Unbrauchbarwerdens erfahren hat.

Als Antwort auf diese zweifelnde Frage OSTWALDS können die unten (**56**) folgenden Sätze eines bedeutenden theoretischen Physikers, POINCARÉ, gelten aus einem Vortrage („Über die Beziehungen zwischen der experimentellen und der mathematischen Physik“, vgl. 1900, Ph. Z. II, 167 und ff.), welcher zugleich auch die Stellung der theoretischen Forschung am Ausgang des 19. Jahrhunderts präzisiert.

55. Richtiger Gebrauch der Hülfsvorstellungen in der Elektrophysik.

Die Benutzung der für viele theoretische und praktische Zwecke vorläufig noch teils unentbehrlichen, teils ökonomisch wertvollen Hülfsvorstellungen unter deutlicher Kennzeichnung als solcher — es sind dies die von POINCARÉ als „indifferent“ bezeichneten Hypothesen (siehe **56**) — scheint hier der richtige Mittelweg zu sein. Auch diese Ansicht findet sich bereits von FARADAY (vgl. Exp. Res. III, 3244) mit folgenden Worten deutlicher gekennzeichnet:

Man darf nicht glauben, dass derartige Spekulationen im Gebiete der physikalischen Wissenschaften unnütz oder notwendig schädlich seien. Man muss sie freilich stets als

zweifelhaft betrachten, muss daran festhalten, dass sie irrig und dem Wechsel unterworfen sein können, aber im übrigen sind sie wundervolle Hülfsmittel in den Händen des Experimentators und Mathematikers. Denn ihr Nutzen besteht nicht bloss darin, dass sie eine vage Vorstellung zunächst zu grösserer Klarheit bringen, ihr gewissermassen eine feste Gestalt verleihen, sodass sie dem Versuche und der Rechnung unterworfen werden kann, sondern sie führen auch auf dem Wege der Deduktion und durch Berichtigung zur Entdeckung neuer Erscheinungen, vermehren und fördern so die physikalischen Wahrheiten, welche nicht, wie die Hypothese, die zu ihnen leitet, dem Wechsel nnterworfen sind, sondern zu fundamentalen Kenntnissen werden. Wer kennt nicht den merkwürdigen Fortschritt der neueren Zeit in der Erkenntnis der Natur des Lichtes und der Strahlung, und wer weiss nicht, bis zu welchem Grade dieser Fortschritt der Emissions- und Undulationshypothese zu danken ist! Solche Überlegungen bilden für mich eine Rechtfertigung, wenn ich mich dann und wann auf Spekulationen einlasse. So hoch ich jedoch dieselben schätze, wenn sie mit Bedachtsamkeit angestellt werden, so betrachte ich es doch als ein wesentliches Merkmal eines gesunden Denkens, das Zweifelhafte derselben im Auge zu behalten, ihnen nicht einmal den Wert von Meinungen beizulegen, sondern sie nur als Wahrscheinlichkeiten und Möglichkeiten hinzustellen und zwischen ihnen und den Thatsachen und Naturgesetzen eine breite Grenze zu ziehen.

Nach ausdrücklicher Vorausschicknng dieses Standpunktes braucht alsdann wohl nicht an jeder Stelle wiederum darauf hingewiesen zu werden.

Diese Betrachtungen allgemeinerer Natur gelten natürlich auch im besonderen für die Wissenschaft der Elektrophysik, ja hier bei der Mittelbarkeit der Wahrnehmung aller Vorgänge, d. h. bei der Unfähigkeit der feineren menschlichen Sinne die elektrischen Vorgänge direkt wahrzunehmen, wohl in hervorragendem Masse. Unter den Sinnen steht hier das Sehvermögen obenan, welches ebenso wie die übrigen als eine Spezialisierung des Tastgefühls auffassbar ist.

Das Bedürfnis zur geistigen Bewältigung dieses Erscheinungsgebietes Hülfsvorstellungen, also ausser den mathemathischen Analogien auch noch solche aus anderen, konkreten Wissensgebieten heranzuziehen, besteht daher für die meisten, ja versteckt wohl für alle, noch bis auf den heutigen Tag. Dass der Entwickelung der Thatsachenkenntnis auch eine solche der Auffassung und jener Hülfsvorstellungen entsprach, ist eigentlich selbstverständlich und auch im ersten Abschnitt kurz angeführt worden. Als Ergänzung hierzu wäre noch auf einige Punkte im Zusammenhang näher hinzuweisen, und namentlich auf die Ausgestaltung der für die meisten gegenwärtig noch bedeutungsvollen neueren Hülfsvorstellungen näher einzugehen. Als neuere Hülfsvorstellungen sind hierbei diejenigen bezeichnet, welche den *untrennbaren* Zusammenhang zwischen Elektrizität und Magnetismus berücksichtigen. Die Aufdeckung dieses Zusammenhanges nahm mit OERSTEDTS Beobachtung (1820) ihren Anfang, während die Älteren elektrische und magnetische Erscheinungen getrennt behandelten. Zu bemerken wäre vielleicht noch, dass die Begründer der älteren „Theorien" diese nicht als Hülfsvorstellungen auffassten, sondern glaubten, damit das innerste und eigentliche Wesen der Elektrizität aufzudecken, d. h. eine völlig zutreffende Vorstellung der elektrischen Erscheinungen zu erhalten. Wenn die heutige moderne Naturwissenschaft nach dieser Richtung viel bescheidener geworden ist und — viel weniger kühn in ihrer Zuversicht — bezüglich der Erkenntnis des letzten Grundes nur eine Beschreibung durch Analogien annimmt, so ist dies teils durch die in der Wissenschaftsgeschichte gemachten Erfahrungen bedingt, teils durch die damit in Zusammenhang stehende Entwickelung der Psychologie, die jetzt in

ihren bleibenden Ergebnissen einen früher ungeahnt grossen Einfluss auf die Erkenntnistheorie gewonnen hat.

56. Moderne Auffassung von Hülfsvorstellungen und Theorien.

Man könnte im ersten Augenblick versucht sein die Bescheidenheit der heutigen Wissenschaft als eine Schwäche derselben anzusehen, gleichsam hervorgegangen aus dem Bankerott vieler Theorien, welche von ihr mit grosser Zuversicht als richtig angenommen worden waren. Das wäre aber kurzsichtig. Gerade in ihrer heutigen Bescheidenheit, hervorgegangen aus einem Fortschritt in der Selbsterkenntnis, beruht ihre Stärke. Wenn früher vor der allgemeineren Erkenntnis der Relativität aller Hypothesen und Theorien eine Lieblingstheorie, welche von vielen als letzte Wahrheit angenommen worden war, zu Bruche ging durch Hinzukommen neuer Erfahrungsthatsachen, also experimenteller Ergebnisse, so wurde dies naturgemäss als eine Niederlage der wissenschaftlichen Ordnungsbestrebungen empfunden und angesehen, welche den kurzsichtigen Feinden der Theorie eine willkommene Waffe bot. Dieser Waffe ist heute durch die Selbsterkenntnis der Wissenschaft die Spitze abgebrochen.

Sehr gut wird dieser moderne Standpunkt durch folgende Sätze Poincarés charakterisiert unter Hinweis auf zwei für die Elektrophysik besonders wichtige Beispiele, die elektromagnetische Lichttheorie und die ganz neue Elektronentheorie (vgl. 1900, Ph. Z. II, 167 u. ff.):

Es genügt eben nicht, dass man beobachtet, die Beobachtungen müssen auch verwertet werden; und dazu muss man verallgemeinern. Das hat man zu allen Zeiten gethan; nur hat man, da die Erinnerung an vergangene Irrtümer den Menschen immer umsichtiger gemacht hat, immer mehr beobachtet und immer weniger verallgemeinert.

Jedes Jahrhundert machte sich über das vergangene lustig und warf ihm vor, zu schnell und zu naiv verallgemeinert zu haben. Descartes sah mitleidig auf die Jonier herab; Descartes seinerseits wird von uns belächelt; ohne Frage werden auch unsere Nachkommen eines Tages über uns lachen.

Können wir denn aber nicht ohne weiteres ans Ziel gelangen? Giebt es kein Mittel diesem Spotte zu entrinnen, den wir vor uns sehen? Können wir uns nicht mit dem reinen Experimente begnügen?

Nein, das ist unmöglich; das hiesse vollständig den wahren Charakter der Wissenschaft verkennen. Der Forscher muss ordnen; man macht Wissenschaft aus Thatsachen, wie man ein Haus aus Steinen baut; aber eine Anhäufung von Thatsachen ist noch ebenso wenig eine Wissenschaft, wie ein Haufen Steine ein Haus.

Wir wissen alle, dass es gute und schlechte Experimente giebt, die letzteren wird man vergebens häufen.

Was ist also ein gutes Experiment? Das ist ein solches, welches uns etwas anderes kennen lehrt, wie eine blosse Thatsache; welches uns voraussehen, d. h. verallgemeinern lehrt.

Denn ohne Verallgemeinerung ist eine Voraussicht unmöglich. Die Umstände, unter denen man operiert hat, werden sich nie in ganz derselben Weise wiederholen. Die beobachtete Thatsache wird also niemals noch einmal eintreten; das einzige, was man behaupten kann, ist, dass unter analogen Umständen eine analoge Thatsache eintreten wird. Um vorauszusehen muss man also zum mindesten die Analogie zu Hülfe nehmen, d. h. aber schon verallgemeinern.

So gewissenhaft man aber auch sein mag, man muss notwendigerweise interpolieren; das Experiment giebt uns nur eine bestimmte Anzahl von vereinzelten Punkten, man muss sie durch eine kontinuierliche Kurve verbinden; das ist eine regelrechte Verallgemeinerung. Aber man thut noch mehr: die Kurve, welche man zieht, wird sich zwischen den beobachteten Punkten hindurch- und nahe bei ihnen vorbeiwinden; sie wird nicht durch diese Punkte selbst hindurchgehen. Man beschränkt sich also nicht darauf, das Experiment zu verallgemeinern, man verbessert es sogar; und der Physiker, der sich dieser Verbesserungen enthalten und sich in Wahrheit mit dem reinen Experiment begnügen wollte, würde gezwungen sein, ganz absonderliche Gesetze auszusprechen.

Die ganz nackten Thatsachen würden uns also nicht genügen; und darum brauchen wir eine geordnete oder richtiger eine organisierte Wissenschaft.

Man sagt oft, es sei nötig, ohne eine vorgefasste Idee zu experimentieren. Das ist aber gar nicht möglich; nicht nur würde dadurch jedes Experiment unfruchtbar, sondern man würde etwas wollen, was man gar nicht könnte. Jeder trägt in sich seine Auffassung von der Welt, von der er sich so leicht nicht frei machen kann. Wir müssen uns doch z. B. der Sprache bedienen, und unsere Sprache ist doch nur aus vorgefassten Ideen zusammengemengt, kann es auch nicht anders sein. Nur sind das unbewusst vorgefasste Ideen, die tausendmal gefährlicher sind als die anderen.

Wenn wir also andere aufkommen lassen, deren wir uns vollbewusst sind, werden wir dann das Übel etwa schlimmer machen? Ich glaube nicht; ich bin vielmehr der Ansicht, dass sie sich wechselseitig als Gegengewicht, ich möchte fast sagen als Gegengift dienen werden; sie werden im allgemeinen schlecht miteinander auskommen, die einen werden mit den anderen in Konflikt geraten, und uns dadurch zwingen, die Dinge unter anderen Gesichtspunkten anzusehen. Das genügt, um uns zu befreien; man ist nicht mehr Sklave, wenn man sich seinen Herrn wählen kann.

So befähigt uns, dank der Verallgemeinerung, jede beobachtete Thatsache, eine ganze Anzahl weiterer vorauszusehen; nur dürfen wir nicht vergessen, dass die erste allein gewiss ist, dass alle weiteren aber besten Falls wahrscheinlich sind. So fest begründet uns auch eine Voraussicht erscheinen mag, wir sind doch niemals absolut sicher, dass das Experiment sie nicht zu Schanden machen wird, wenn wir daran gehen, sie wahr zu machen. Aber die Wahrscheinlichkeit ist oft gross genug, dass wir uns praktisch mit ihr zufrieden geben können.

In gleicher Weise muss man Sorge tragen, zwischen den verschiedenen Arten von Hypothesen zu unterscheiden. Man hat da in erster Linie solche, die durchaus natürlich sind, und denen man sich kaum entziehen könnte. Es ist schwer nicht anzunehmen, dass der Einfluss sehr entfernter Körper vollständig vernachlässigt werden kann, dass die kleinen Bewegungen einem linearen Gesetze gehorchen, dass die Wirkung eine stetige Funktion ihrer Ursache ist. Ich möchte das gleichsam als Bedingungen bezeichnen, die durch Symmetrie vorgeschrieben sind. Alle diese Hypothesen bilden sozusagen den gemeinsamen Boden aller Theorien der mathematischen Physik. Es sind die letzten, die man aufzugeben braucht.

Eine zweite Klasse von Hypothesen möchte ich als die indifferenten bezeichnen. Bei den meisten Fragen setzt der Analytiker beim Beginn seiner Rechnung voraus, dass die Materie entweder kontinuierlich oder dass sie im Gegenteil aus Atomen zusammengesetzt ist. Er würde auch etwas ganz anderes gethan haben, wenn nur seine Resultate dadurch nicht geändert würden; vielleicht hätte er dadurch mehr Mühe gehabt, sie zu erhalten, das wäre alles. Wenn jetzt das Experiment seine Schlussfolgerungen bestätigt, wird er dann denken, beispielsweise die wahre Existenz von Atomen nachgewiesen zu haben?

Diese indifferenten Hypothesen sind niemals gefährlich, vorausgesetzt, dass man nicht ihren Charakter verkennt. Sie können nützlich sein, sei es als Kunstgriffe der Rechnung, sei es, um unser Begriffsvermögen durch konkrete Bilder zu stützen und die Ideen zu fixieren, wie man sagt. Man braucht sie daher nicht in die Acht zu erklären.

Die Hypothesen der dritten Klasse sind die wahren Verallgemeinerungen. Sie sind es, die das Experiment bestätigen oder verwerfen muss. Bestätigt oder verworfen, werden sie immer fruchtbar sein.

Jede Verallgemeinerung ist eine Hypothese; die Hypothese hat also eine notwendige Bedeutung, die noch nie Jemand bestritten hat. Nur muss sie alle Zeit, so bald und so oft als möglich, der Bestätigung unterzogen werden. Es ist selbstverständlich, dass man sie ohne Hintergedanken verlassen muss, wenn sie diese Prüfung nicht besteht. Das geschieht auch im allgemeinen, aber zuweilen mit einem gewissen bitteren Gefühl.

Freilich selbst dieses bittere Gefühl ist nicht gerechtfertigt. Der Physiker, der in der Lage ist, auf eine seiner Hypothesen zu verzichten, müsste im Gegenteil voller Freude sein, denn er ist im Begriff eine unverhoffte Gelegenheit zu Entdeckungen zu finden. Seine Hypothese, bilde ich mir ein, war nicht so leichthin angenommen worden; sie trug allen denjenigen bekannten Faktoren Rechnung, die an der Erscheinung mitwirken zu können schienen. Wenn die Bestätigung ausbleibt, so heisst das, dass irgend etwas Unerwartetes, Aussergewöhnliches da ist; man ist also im Begriff etwas Neues zu finden.

Ist eine Hypothese, die so zu Falle kommt, unfruchtbar gewesen? Weit entfernt. Man kann vielmehr sagen, dass sie mehr Dienste geleistet hat, als eine wahre Hypothese; sie war nicht nur die Veranlassung zu einem entscheidenden Experiment, sondern man

würde ohne die Hypothese dieses Experiment höchstens zufällig gemacht haben, so dass man nichts daraus geschlossen haben würde; man würde nichts aussergewöhnliches darin erblickt haben, man würde nur eine Thatsache mehr registriert haben, ohne eine Konsequenz daraus zu ziehen.

Der Laie ist erstaunt, wenn er sieht, wieviele wissenschaftliche Theorien überlebt sind. Nach einigen Jahren des Gedeihens sieht er sie aufgegeben; er sieht Trümmer sich über Trümmer häufen; er sieht voraus, dass die heute modernen Theorien ihrerseits über kurzem zusammenstürzen werden und schliesst daraus, dass sie durchaus nichtig seien. Er nennt das den Bankerott der Wissenschaft.

Sein Zweifel ist überflüssig; er hat sich niemals von dem Zweck und den Zielen der Wissenschaft Rechenschaft gegeben, sonst würde er lernen, dass auch noch Ruinen zu etwas gut sein können.

Keine Theorie schien fester begründet als die FRESNELs, welcher das Licht Ätherbewegungen zuschrieb. Und doch zieht man ihr heute diejenige MAXWELLs vor. Will das etwa sagen, dass das Werk FRESNELs vergeblich gewesen ist? Nein, denn das Ziel FRESNELs war nicht, zu wissen, ob es wirklich einen Äther giebt, ob er aus Atomen besteht oder nicht, ob sich diese Atome wirklich in diesem oder jenem Sinne bewegen oder nicht; sein Ziel war vielmehr optische Erscheinungen vorauszusehen.

Und das gestattet die FRESNELsche Theorie noch immer, heute so gut wie vor MAXWELL. Ihre Differentialgleichungen sind immer wahr; man kann sie immer in derselben Weise integrieren und die Ergebnisse dieser Integration behaupten alle Zeit ihren vollen Wert.

Man sage nun nicht, dass wir so die physikalischen Theorien in die Rolle einfacher praktischer Rezepte herunterdrücken; jene Gleichungen drücken Beziehungen aus, und wenn die Gleichungen wahr bleiben, so heisst das, dass diese Beziehungen ihre Gültigkeit behalten. Sie lehren uns nach wie vor, dass eine Beziehung zwischen einer Sache und einer anderen besteht. Nur, dass wir das, was wir einst Bewegung nannten, heute elektrischen Strom nennen. Aber diese Benennungen waren nie mehr als Bilder, welche man den wahren Dingen untergeschoben hat, die uns die Natur für ewige Zeiten verhüllen wird. Die thatsächlichen Beziehungen zwischen diesen wahren Dingen sind die einzige Wirklichkeit, die uns zugänglich ist, und die einzige Bedingung dafür ist, dass dieselben Beziehungen zwischen diesen Dingen bestehen, wie zwischen den Bildern, die wir notwendigerweise an ihre Stelle setzen müssen. Wenn uns diese Verhältnisse klar sind, was liegt uns daran, ob wir es für bequemer erachten, ein Bild durch ein anderes zu ersetzen.

Dass irgend eine periodische Erscheinung (eine elektrische Schwingung z. B.) thatsächlich durch die Schwingung einer Art von Atome zustande komme, die sich wie Pendel in diesem oder jenem Sinne aus ihrer Gleichgewichtslage entfernen, dass ist weder gewiss noch interessant. Aber dass zwischen der elektrischen Schwingung, der Pendelbewegung und allen periodischen Erscheinungen eine innere Verwandtschaft besteht, welche einer verborgenen Wirklichkeit entspricht, dass diese Verwandtschaft, diese Ähnlichkeit, oder besser dieser Parallelismus sich bis in die Einzelheiten verfolgen lässt, dass sie eine Folgerung allgemeiner Prinzipien ist, nämlich des Prinzips der Energie und desjenigen der kleinsten Wirkung, das können wir bestätigen; das ist die Wahrheit, die alle Zeit dieselbe bleiben wird, unter jedem Gewande, mit dem wir sie herauszuputzen für gut finden.

Die kinetische Theorie der Gase hat zu sehr vielen Einwänden Anlass gegeben, auf die schwer etwas zu entgegnen wäre, wenn man in ihr die absolute Wahrheit zu erblicken vorgäbe. Aber alle diese Einwände können nichts daran ändern, dass sie nützlich gewesen ist, und dass sie es besonders dadurch gewesen ist, dass sie uns eine wahre und ohne sie tief verborgene Beziehung enthüllt hat, nämlich diejenige zwischen dem Gasdruck und dem osmotischen Druck. In diesem Sinne kann man doch sagen, dass sie wahr ist.

Wenn ein Physiker einen Widerspruch findet zwischen zwei Theorien, die ihm in gleicher Weise lieb sind, so sagt er zuweilen, wir wollen uns nicht darüber beunruhigen, sondern wollen die beiden Enden der Kette fest halten, obgleich uns die zwischenliegenden Glieder verborgen sind. Dieses Argument nach Art eines in die Enge getriebenen Theologen wäre lächerlich, wenn man den physikalischen Theorien den Sinn unterlegen wollte, den ihnen der Laie giebt. Im Falle des Widerspruches müsste wenigstens eine von ihnen für falsch erklärt werden. Das ist anders, wenn man in ihnen nur das sucht, was man in ihnen suchen muss. Es kann vorkommen, dass sie beide wahre Beziehungen

ausdrücken und dass der Widerspruch nur in den Bildern besteht, mit denen wir die Wirklichkeit umkleidet haben.

Denjenigen, die der Meinung sind, dass wir das den Forschern zugängliche Gebiet zu eng abstecken, möchte ich erwidern: die Fragen, die wir Euch verbieten, und die Ihr mit Bedauern preisgeben müsst, sind nicht nur unlösbar, sondern sie sind sogar illusorisch und ohne Sinn und Verstand.

Ein solcher Philosoph behauptet z. B., dass die ganze Physik durch gegenseitige Stösse der Atome zu erklären sei. Wenn er damit nur sagen will, dass zwischen den physikalischen Erscheinungen, dieselben Beziehungen bestehen, wie zwischen den wechselseitigen Stössen einer grossen Zahl von Billardbällen, wohlan, so ist das der Bestätigung zugänglich und kann wahr sein. Aber er will weit mehr sagen; und wir glauben ihn zu begreifen, weil wir zu wissen glauben, was der Stoss an sich ist; warum? ganz einfach, weil wir sehr oft dem Billardspiel zugesehen haben. Meinen wir nun, dass Gott, wenn er sein Werk betrachtet, dieselben Empfindungen haben wird wie wir, wenn wir einem Billardwettkampf zusehen? Wenn wir jenen Versicherungen nicht diesen bizarren Sinn geben und ihnen noch weniger den beschränkten Sinn unterlegen wollen, den ich eben auseinandergesetzt habe und der der richtige ist, so haben sie überhaupt keinen mehr.

Die Hypothesen dieser Art haben also nur einen bildlichen Sinn. Der Forscher braucht sie sich nicht zu untersagen, ebensowenig wie sich der Dichter die Bilder versagt; aber er muss wissen, welchen Wert sie haben. Sie können nützlich sein, um dem Geiste eine Genugthuung zu geben, und sie werden nicht schädlich wirken, vorausgesetzt, dass sie nur indifferente Hypothesen sind.

Diese Erwägungen zeigen uns auch, warum gewisse Theorien, die man endgültig verlassen und vom Experimente widerlegt glaubte, plötzlich wieder aus ihrer Asche auferstehen und ein neues Leben beginnen. Darum weil sie wahre Beziehungen ausdrückten; und weil sie nicht aufgehört hatten, das zu thun, als man aus dem einen oder anderen Grunde dieselben Beziehungen in einer anderen Sprache ausdrücken zu müssen glaubte. Sie hatten so eine Art latenten Lebens bewahrt.

Noch vor kaum 15 Jahren gab es keinen lächerlicheren, mehr überwundenen Standpunkt, als die Fluida COULOMBS; und siehe da, sie erscheinen heute unter dem Namen Elektron wieder. Wodurch unterscheiden sich diese elektrisierten Moleküle von bleibender Form von den elektrischen Molekülen COULOMBS? Freilich bei den Elektrons wird die Elektrizität von etwas Materie getragen; aber von wie wenig; mit anderen Worten, sie haben eine Masse; auch COULOMB verweigerte seinen Flüssigkeiten die Masse nicht oder, wenn er es that, nur mit Vorbehalt. Es wäre kühn zu behaupten, dass der Glaube an die Elektrons nicht einst wieder erschüttert würde. Dies würde nicht weniger seltsam sein, wie diese unerwartete Wiedergeburt zu konstatieren.

B. Ältere Hülfsvorstellungen.

57. Die Zeit bis zu Franklin.

Die älteste und roheste Analogievorstellung bei den ersten elektrischen und magnetischen Erscheinungen, welche dem komplizierteren aber länger bekannten biologischen Gebiet entlehnt ist und eine Art von Leben im Bernstein annahm, ist bereits (2) als von THALES herrührend erwähnt worden. Noch nicht viel entwickelter zeigen sich die Vorstellungen mehr als zweitausend Jahre später.

Für das Verständnis der Anfänge der Elektrizitätswissenschaft ist folgende Bemerkung ROSENBERGERS (vgl. „Entwickelung der elektrischen Prinzipien", Leipzig 1898, bei A. BARTH; Seite 4) wichtig:

Alle zwischen den Körpern oder Teilen derselben wirkenden Anziehungskräfte leitete man im Altertum und im Mittelalter aus anerschaffenen Sympathien oder Naturtrieben ab, wenn sie zwischen den gleichen Materien in immer gleicher Weise wirksam waren, oder durch Ausflüsse gewisser in den betreffenden Körpern enthaltener feiner, unsichtbarer Stoffe, wenn die Kräfte zwischen verschiedenen Stoffen

nur unter bestimmten Umständen wirksam wurden. Beim Magneten schwankte man wohl zwischen beiden Erklärungsweisen, die Anziehungskräfte des geriebenen Bernsteins aber wurden allgemein auf die letztere Art abgeleitet. Doch blieb dabei die Art, wie die Ausflüsse, die ihnen gerade entgegen gerichteten Anziehungen bewirken sollten, immer recht unbestimmt, und jeder originelle Physiker stellte sich die Sache auf andere Weise vor.

Das Substantiv Electricitas, das als ein Abstraktum die elektrischen Erscheinungen von dem Einzelbegriff des Bernsteins unabhängiger machte, ist im ganzen siebzehnten Jahrhundert noch nicht anzutreffen, erst zu Anfang des achtzehnten tritt es plötzlich auf, ohne dass eine besondere Ursache für die Bildung dieses Wortes zu entdecken wäre und ohne dass man darunter viel anderes verstanden hätte als unter dem Ausdrucke Vis electrica. Dem entsprechend kann auch von einer eigentlich elektrischen Theorie bis zu dieser Zeit nicht die Rede sein. Die Vis electrica war bis dahin eine Anziehungskraft, wie sie schon vielfach zwischen Körpern beobachtet worden, und unterschied sich nur darin von anderen, dass sie nur in wenigen bestimmten Stoffen und erst nach dem Reiben derselben merkbar wurde. Die Bernsteinkraft wurde darum auch ganz entsprechend den anderen bekannten Anziehungskräften ohne grosse Schwierigkeit erklärt.

Die Vorstellung der Ausflüsse, welche sich später zu der materiellen, aber unseren heutigen (FARADAYschen) Vorstellungen im Prinzip verwandten Auffassung der elektrischen Atmosphäre ausbildete, fand namentlich eine Stütze in der Naturphilosophie des DESCARTES (Cartesius), welche alle Erscheinungen „kinetisch", d. h. durch Bewegungen feiner („verborgener" sagen wir heute) Materien zu erklären versuchte und dadurch den natürlichen Gegensatz bildete zu der späteren und — vielleicht nur teilweise mit Recht — auf NEWTON zurückgeführten dynamischen Auffassung, d. h. mittels eingepflanzter Kräfte, welche ohne materielle Vermittelung in die Ferne wirken (actio in distans).

Als Beispiel für die ursprünglichen Ausflussvorstellungen seien einige Äusserungen von DESCARTES (Prinzipien der Philosophie 1644) über die Erklärung der elektrischen Erscheinungen hier angeführt (vgl. ROSENBERGER, Seite 5):

Alle Körper, die aus grober Materie, dem DESCARTESschen dritten Element, bestehen, haben Poren und Gänge in sich, die bei jedem Körper besonders gestaltet und von besonderer Grösse sind. In diesen Gängen bewegen sich Teilchen der feinsten und schnellsten Materie, des DESCARTESschen ersten Elementes, die meistens länglich gestaltet sind und sich darum leicht aneinander heften und, wenn sie länger in einem Körper sich bewegen, zu dünnen, breiten und länglichen Bändern werden, die der Gestalt von dessen Poren entsprechen. Solche Bänder scheinen vor allem im Glas zu entstehen und scheinen gezwungen im Glas zu verweilen, da entsprechende Gänge in der stets bewegten Luft nicht vorhanden sind. Wird aber das Glas stark gerieben, sodass es etwas warm und auch in seinen Poren ausgedehnt wird, so werden augenscheinlich diese Bänder herausgestossen, verteilen sich gewaltsam in die umgebende Luft und dringen auch in die Gänge anderer hier befindlicher Körper ein. Allein da sie hier doch keine ihnen passende Gänge finden, so kehren sie gleich wieder nach dem Glase zurück und nehmen die kleinen Körper, in deren Gängen sie stecken, mit sich zurück. Gleiches, wie hier vom Glase, wird von dem meisten anderen elektrischen Körper gelten.

Trotz des späterhin starken gegensätzlichen Einflusses der NEWTONschen Philosophie und namentlich der aus der Verallgemeinerung des Gravitationsgesetzes sich ergebenden rein dynamischen Auffassung der Naturerscheinungen durch seine Nachfolger, schloss sich NEWTON selbst bezüglich der elektrischen Erscheinungen diesen Ausflussvorstellungen seines philosophischen Gegners (DESCARTES) an.

Bei ROBERT BOYLE (1675) ist es eine unsichtbare klebrige Substanz, welche der elektrisch gemachte Körper ausströmt, und die beim Zurück-

kehren zu ihrer Ausgangsstelle die sich anheftenden leichten Körperchen mitreisst. Die Beobachtung der Übertragbarkeit der Reibungselektrizität auf andere Körper, d. h. die Vermutung ihrer Quantitätseigenschaften liessen Newton ihre Erscheinungen mit denen anderer Wissensgebiete wie Wärmelehre und Optik in Verbindung bringen, woraus sich nach den damals geläufigen Fluidumsvorstellungen und besonders der von ihm vertretenen Emanationstheorie des Lichtes seine Auffassung der Elektrizität als „elastisches Fluidum, welches beim Reiben in das Glas eindringt", erklärt. Diese Fluidumsvorstellung, welche bei der Beobachtung der Fortleitbarkeit und Teilung des elektrischen Zustandes sich immer mehr entwickelte, ist unschwer als eine der Hydraulik entnommene Analogie (Hülfsvorstellung) erkennbar, wobei man einem solchen Fluidum die Haupteigenschaften des Wassers, zuweilen in Verbindung mit der grösseren Elastizität der Gase, zuschrieb und später auch wie bei der Wärme, durch Hinzufügung der Gewichtslosigkeit die Umformung in ein „Imponderabile" vollzog.

Die von Guericke und später von Hawksbee beobachteten und untersuchten elektrischen Lichterscheinungen (vgl. 2) wurden zunächst einer besonderen „Kraft" bezw. einem besonderen Effluvium zugeschrieben und noch von s'Gravesande in seiner Elektrizitätslehre (1745) in diesem Sinne behandelt in dem Kapitel „von dem in die Körper eingeschlossenen Feuer", wobei er Anschauungen über die Entstehung des Leuchtens infolge Schwingens jener Atmosphäre entwickelt, deren Verwandtschaft mit modernen sogenannten Erklärungen des Glimmlichts durch schwingende Valenzladungen nicht ohne Interesse ist. Allmählich verschmolz man aber jene beiden Effluvien immer mehr unter der Bezeichnung des „elektrischen Feuers".

Inzwischen war durch Gray 1731 (vgl. 3) eine hinsichtlich der weiteren Entwickelung der Elektrophysik folgenschwere Änderung in der bisherigen Auffassung über das Verhältnis zwischen Körpern und jenen Effluvien oder Atmosphären eingeleitet worden (vgl. Rosenberger, 11):

Gray aber nahm, ohne weitere Überlegung und ohne weiteres Aufheben davon zu machen, einfach an, dass diese Ausflüsse oder Atmosphären auch dauernd von einem Körper auf den anderen übergehen könnten, ohne je wieder auf den ersteren zurückzukehren. Damit war freilich die Erklärung der elektrischen Anziehungen und Abstossungen durch entgegengesetzte Strömungen in den elektrischen Atmosphären unmöglich geworden, aber diese Erklärung war jetzt auch nicht mehr nötig. Die Entwickelung der Newtonschen Physik führte von selbst dazu, den verschiedenen Materien ihre Wirkungsfähigkeiten als besondere primitive Kräfte zuzuschreiben und so legte man nun auch den elektrischen Atmosphären die Anziehungs- und Abstossungskräfte ohne weitere Ableitung bei.

Die fundamentalen Entdeckungen von du Fay (veröffentlicht in den Jahren 1733—1737 vgl. 3) über den Gegensatz der „glashaften" und „harzigten" Elektrizität machte aber eine Modifikation der bisherigen Auffassungen notwendig. Dies geschah im Sinne von Descartes in einer verbesserten Theorie der „Ausflüsse" durch den französischen Physiker Abbé Nollet, der von 1745 an auf dem Festlande grosse Anhängerschaft erlangte, bald in Gegensatz zu der mehr im Newtonschen Geiste gefassten Franklinschen Theorie geriet und seine 18 Leitsätze (siehe Rosenberger, 14) im Jahre 1754 nochmals zusammenfasste. Obwohl auch Euler in den Jahren 1760 bis 1762 in seinen „Briefen an eine deutsche Prinzessin" eine der Nolletschen ähnliche elektrische Hypothese entwickelte unter Benutzung eines den Raum kontinuierlich erfüllenden elastischen Äthers, so war doch der Einfluss

von NEWTONS Weltanschauung unter immer stärkerer Hervorkehrung des dynamischen Prinzips (der eingepflanzten, in die Ferne wirkenden Kräfte) von seiten seiner Nachfolger so gross und allgemein geworden, dass die leichter dieser Auffassung anzupassende FRANKLINsche Hypothese rasch zu der herrschenden wurde. Die grössere Einfachheit sowie die Erscheinungen der damals entdeckten Influenzelektrizität erleichterten ihr noch den Sieg, dessen Erfolg aber nie unbestritten und auch von verhältnismässig kurzer Dauer war, insofern FRANKLINS unitarische Hypothese bei sehr vielen alsbald durch die SYMMERsche dualistische verdrängt wurde. Die grosse Förderung sowohl, welche die Elektrizitätswissenschaft durch FRANKLINS einheitliche Darstellung der elektrischen Erscheinungen erfuhr, als auch die vielen Beziehungspunkte, welche unsere modernen Hülfsvorstellungen, namentlich die FARADAY-MAXWELLschen, mit der FRANKLINschen aufweisen, lassen dieselbe auch heute noch von grossem Interesse erscheinen, wenn auch bei FRANKLIN aus Unkenntnis über die wichtige Rolle des Dielektrikums ein Hauptmoment noch fehlt, nämlich die Heranziehung des dielektrischen Zwangszustandes zur Erklärung der Erscheinungen.

58. Frankllns und Symmers Vorstellungen.

FRANKLIN, welcher die Ansicht GRAYS, dass die Elektrizität die Körper ganz durchdringe, angenommen hatte, erklärte die Verschiedenartigkeit der Glas- und Harzelektrizität durch eine Abweichung von der normalen Menge nach oben beziehungsweise unten. FRANKLINS Vorstellung wird durch folgende Worte WILKES, welcher seine Briefe übersetzte (vgl. ROSENBERGER, 16), bezeichnet:

> Durch die ganze körperliche Natur ist eine subtile Materie verbreitet, welche den Grund und die Ursachen aller elektrischen Erscheinungen enthält. Die Teile dieser feinen Materie, welche man nach Belieben Äther, Feuer, Licht und dergleichen mehr benennen kann, stossen sich untereinander ab. Sie werden aber von den Teilen der gemeinen Materie, aus welchen die Körper bestehen, stark angezogen. Enthält ein Teil körperlicher Materie so viel von dieser feinen elektrischen Materie, als er einnehmen kann, ohne dass dieselbe auf der Oberfläche mehr als im Innern gehäuft liegen bleibt, so ist er, in Absicht auf die Elektrizität, in natürlichem Zustande. Ein mehreres macht ihn positiv oder plus, weniger aber negativ oder minus elektrisch. Alle elektrischen Erscheinungen entstehen durch den Übergang dieser Materie aus einem Körper in den anderen und die dadurch hervorgebrachte ungleiche Verteilung derselben in den Körpern.

Bezüglich des Verhaltens der Leiter und Nichtleiter der Elektrizität treten noch folgende Vorstellungen hinzu: die Metalle werden von der elektrischen Materie, die er gewöhnlich als das „elektrische Feuer" bezeichnet, durchdrungen, und können beliebig viel von ihr aufnehmen; alle Nichtleiter, wie z. B. Glas, werden nicht von ihr durchdrungen, ziehen aber die Elektrizität stark an, sodass sich dieselbe an ihrer Oberfläche sammelt und dort festgehalten wird, doch in normalem Zustande nicht nachweisbar ist. Die Entstehung einer positiven Ladung, also eines Überschusses auf dem geriebenen Glas erklärt er etwas phantastisch in der Weise, dass das durch die Reibung erwärmte Glas sich ausdehnt, infolgedessen mehr Elektrizität aufnehmen kann, welche es dem Reibzeug entzieht, während nach der Reibung eine Erkaltung, d. h. Zusammenziehen der Oberfläche eintritt, wodurch die aufgenommene Elektrizität frei wird und nach Art einer Atmosphäre sich auf der Oberfläche anhäuft.

Die erste Hälfte seiner Vorstellungen muss offenbar als gelungen bezeichnet werden und hat wohl auch auf spätere Vorstellungen eingewirkt. Die „Erklärung" der meisten damals bekannten elektrischen Erscheinungen

mit dieser „Theorie" gelang ihm zwar, doch von den Folgerungen: dass die elektrischen Teilchen Anziehung auf die materiellen, dass aber die elektrischen unter sich ebenso wie die materiellen unter sich Abstossung ausübten, forderte die letztere schon eine etwas gewaltsame Erklärung, um die Übereinstimmung mit der Erfahrung der Gravitation zu ermöglichen.

Die Schwierigkeiten, welche einzelne Erscheinungen den Franklinschen Annahmen boten, hatten zur Folge, dass die wenige Jahre nach ihm (1759) von Symmer aufgestellte „dualistische Theorie" alsbald immer mehr an Boden gewann und lange Zeit die in der Wissenschaft herrschende blieb, weil durch sie trotz ihrer namentlich später beim galvanischen Strom immer mehr zu Tage tretenden Vorstellungsschwierigkeit die Erklärung jener reibungselektrischen Erscheinungen besser gelang, und noch lange einen durch Tradition bedingten überwiegenden Einfluss auf die Entwickelung der Elektrophysik ausübte. Nach dieser dualistischen Auffassung hat jeder Körper im natürlichen, d. h. unelektrischen Zustande den gleichen Gehalt der beiden verschiedenen, sich gegenseitig bindenden oder neutralisierenden elektrischen Fluida. Eine elektrische Erregung entweder durch Reibung oder durch Influenz bewirkt eine teilweise Scheidung der Fluida. Zwischen den beiden geriebenen Körpern findet ein Austausch der Elektrizitäten statt, so zwar, dass auf dem einen ein gleich grosser Überschuss von positiver Elektrizität sich befindet, wie von negativer Elektrizität auf dem anderen. Wird ein derart mit „freier" Elektrizität geladener Körper einem anderen bisher neutralen leitenden Körper genähert, so findet auf letzterem infolge Anziehung ungleichnamiger, Abstossung gleichnamiger Fluida eine Scheidung statt. Bleibt dieser „influenzierte" Körper isoliert, so bleiben zwar die Mengen der beiden Fluida auf ihm als Gesamtheit vor- und nachher gleich gross, doch findet zwischen den der „freien" Elektrizität näheren und ferneren Teilen ein Austausch statt und damit in Verbindung die Bildung einer elektrischen Differenz. Diese lässt die beiden Teile verschieden geladen erscheinen und verursacht bei ableitender Berührung des einen Endes bezw. des einen Fluidums eine zurückbleibende einseitige Ladung des influenzierten Körpers mit dem anderen Fluidum auch nach Entfernung des influenzierenden Körpers. Ohne ableitende Berührung wird der influenzierte Körper nach Entfernung des influenzierenden wieder neutral.

59. Coulombs und Newtons Einfluss.

Die elektrischen Erscheinungen, besonders diejenigen bei den Sammelapparaten, wie die Franklinsche Tafel, liessen unter Benutzung dieser dualistischen Vorstellung eine scheinbar ungezwungenere Deutung zu. Als bei den weiteren Untersuchungen mit gespannter Reibungselektrizität in Sammelapparaten, wie Leydener Flaschen und dergleichen, immer mehr das analoge Verhalten der Elektrizität mit umfüllbaren und teilbaren Flüssigkeitsmengen auffiel, bildete sich der Begriff der Elektrizitätsmenge, entsprechend einer Wassermenge, mehr und mehr in seiner noch heute üblichen Bedeutung aus. Namentlich waren es die Untersuchungen von Coulomb (vgl. 8), welche für die allgemeinere Verwendung dieses Begriffes unter Zugrundelegung der stofflichen Fluidumsvorstellung nach Analogie einer Wassermenge ausschlaggebend wirkten. Hierdurch wurde für die quantitative Formulierung der Begriff der Elektrizitäts*menge* gleichsam zur Grundlage zunächst der Elektrostatik, welche alsbald Veranlassung fand, als ergänzenden Begriff denjenigen der „Dichte", auch „Intensität" genannt, das ist unserer heutigen „Spannung",

einzuführen. Später wurde die „Elektrizitätsmenge“ auch für die Vorstellungen der Elektrodynamik grundlegend, insofern die Stromstärke als die in der Zeiteinheit bewegte Elektrizitätsmenge eingeführt wurde. Gelegentlich eines Vergleichs der Begriffe Wärmemenge, Elektrizitätsmenge, Wassermenge weist E. Mach (vgl. „Prinzipien der Wärmelehre“, 323) nach, dass die Einführung des Begriffes „Elektrizitätsmenge“ mit seiner der „Wassermenge“ analogen Bedeutung, insofern bei beiden eine Energiemenge in beiden Fällen erst durch Multiplikation mit Spannung bezw. Druckdifferenz (Potential, Fallhöhe) erhalten wird, eigentlich auf ein zufälliges Moment in der geschichtlichen Entwickelung der Elektrophysik zurückzuführen ist. Wären den Beobachtungen Coulombs an der Drehwage (1785) über die ponderomotorischen Wirkungen, welche direkt proportional einer Grösse sind, die durch unseren heutigen Begriff der Elektrizitätsmenge dargestellt wird, diejenigen von Riess an seinem elektrischen Luftthermometer (1838) vorausgegangen, was geschichtlich ganz gut denkbar ist, so würde wahrscheinlich die entwickelte Wärmemenge mit der Elektrizitätsmenge in direkte Beziehung gesetzt worden sein. Alsdann wäre der Begriff der Elektrizitätsmenge analog demjenigen der Wärmemenge gewählt, d. h. als Energie definiert worden. Für die Geschichte der Hülfsvorstellungen und den relativen Wert der Begriffe sind derartige Betrachtungen von grosser Wichtigkeit, da sie die Abhängigkeit unserer heutigen Vorstellungen und Begriffe von einem gewöhnlich als Zufall bezeichneten Moment erkennen lassen.

Der nachhaltige und besonders grosse Einfluss der Ergebnisse von Coulombs Arbeiten auf die ganze spätere Entwickelung der Elektrophysik, wurde zum grossen Teil durch die in die Augen springenden Analogien mit länger bekannten und rein d y n a m i s c h aufgefassten Erscheinungen veranlasst. Das Coulombsche Gesetz, d. h. die zahlenmässige Analogie für die von ihm untersuchten ponderomotorischen Erscheinungen ruhender „freier“ Elektrizität, verursachte zunächst durch seine Analogie mit dem Newtonschen Gravitationsgesetz, dass der der Masse analoge Begriff der Elektrizitätsmenge zur Grundlage gewählt wurde; bei der Neigung, welche auf allen Gebieten der Naturwissenschaft für den Newtonschen Kraftbegriff bestand, wurde diese neue Analogie zwischen elektrischen und mechanischen, namentlich astronomischen Verhältnissen mit dem grössten Enthusiasmus aufgenommen und die weitgehendsten Folgerungen im physikomathematischen Sinne gezogen. Zunächst wurde unter Zurückdrängung aller Vorstellungen über den Einfluss des Zwischenmittels, ja teilweise unter Nichtachtung dahingehender Beobachtungen (vgl. 7) die bei der Gravitation allgemein benutzte Auffassung der Fernwirkung leichten Herzens auch für die elektrischen Bewegungserscheinungen übernommen, weiterhin auch der Einfluss dieser Auffassung auf die magnetischen Erscheinungen in weitgehendem und für später durchaus nicht heilsamem Masse ausgedehnt. Die Gleichheit der Zahlenanalogie bei den p o n d e r o m o t o r i s c h e n Wirkungen von Elektrizitätsmengen und den „Polen“ permanenter Magnete bedingte nicht nur die raschere Beseitigung etwaiger Skrupel über die gedanklich wenig befriedigende Fernwirkung auch für den Magnetismus, sondern führte auch zu der bei den Magneten wenig glücklichen Vorstellung der magnetischen Fluida nach Analogie der elektrischen, eine Hülfsvorstellung, welche in Verbindung mit den gleichfalls nach Analogie der elektrischen Wirkungszentren als punktförmig gedachten Polen sich namentlich durch die Schwierigkeit ihrer Beseitigung

ausgezeichnet hat, als die neueren, von der sich entwickelnden Elektrotechnik benutzten Hülfsvorstellungen mit jenen in Kampf gerieten.

60. Anbahnung der neueren Vorstellungen.

Auch die Entdeckung und erste Entwickelung des Galvanismus kam mit den einfachen Vorstellungen der Fluidumstheorien zunächst noch aus. Die elektrochemischen Zersetzungserscheinungen bedingten nur einen gewissen Ausbau der Fluidumsvorstellungen bezüglich des Verhältnisses des elektrischen Fluidums, beziehungsweise der beiden Fluida, zu den chemischen Atomen und Molekülen. Die wichtigeren dieser Auffassungen wurden bereits im ersten Teil (vgl. **14**) angeführt.

Die Entdeckung OERSTEDTS fügte jedoch den von kritischer veranlagten Naturen bisher resigniert hingenommenen Fernwirkungen, noch eine weitere hinzu, in Gestalt der elektromagnetischen, d. h. der ponderomotorischen Wirkung zwischen strömender Elektrizität und Magneten, beziehungsweise noch eine weitere, der statischen entgegengesetzte zwischen zwei stromdurchflossenen Leiterstücken. Dass die hierdurch immer mehr leidende Einheitlichkeit der zusammengehörigen Wissensgebiete nach einer neuen, verbindenden Auffassung drängte, empfanden wohl verschiedene Forscher, wie die in **30** erwähnten Auffassungen erkennen lassen, unter anderem auch die von AMPÈRE aufgestellte Theorie der Magnete. Die Anbahnung der neuen Zeit bezüglich der Auffassung aller elektromagnetischen Erscheinungen zur Zeit der Schaffung des absoluten Masssystems durch GAUSS und WEBER wird durch ROSENBERGER (vgl. a. a. O., 72) mit folgenden Worten charakterisiert:

> GAUSS war, wie alle Mathematiker und die meisten Physiker der damaligen Zeit, noch ein unzweifelhafter Anhänger der Imponderabilien und der Kräfte NEWTONscher Observanz. Doch wies seine Zurückführung aller physikalischen Grössen auf die Einheiten von Raum, Zeit und Materie, also auf reine Bewegungselemente, auf die Erklärung aller physikalischen Erscheinungen durch Bewegungen der Materie, als ihre gemeinsame Ursache unbewusst aber deutlich hin. Damit rückte trotz allen Glanzes, der die NEWTONsche Physik noch umgab, doch die Zeit immer näher, wo die Idee der primitiven Kräfte bei der Erklärung der Naturerscheinungen immer mehr in den Hintergrund und die Annahme primitiver Bewegungen immer stärker in den Vordergrund zu treten begann. In der That war der grosse Physiker, der diese Umwälzung vom elektrischen Gebiete aus mutig und energisch einleitete, um jene Zeit, Anfang der dreissiger Jahre des Jahrhunderts, schon erfolgreich an der Arbeit.

Die Nachhaltigkeit der von FARADAY ausgebildeten Vorstellungen, welche sich neuerdings auf allen Gebieten durchgerungen haben, dürfte gerade seiner Abneigung gegen alle phantastischen Verknüpfungen und der kritischen Skepsis zuzuschreiben sein, welche er sich gegenüber der Vorstellung von unsichtbaren Vorgängen bewahrte und welche ihn zuerst den Charakter derselben als Hülfsvorstellungen deutlich erkennen liess (vgl. **55**). Gerade diese Eigenschaften, verbunden mit dem richtigen Mass von Selbstkritik, liessen ihn Vorstellungen entwickeln, welche sich als ausserordentlich nutzbringend erwiesen, und die zwar später noch etwas weiter ausgebaut und modifiziert doch als die Grundlage unserer heutigen Hülfsvorstellungen anzusehen sind.

C. Die neueren Hülfsvorstellungen.

61. Faradays wissenschaftliche That.

Die älteren Hülfsvorstellungen vermochten bei der physikalischen Seite der Erscheinungen das nähere Eingehen auf die Atom- und Molekülvorstellung in Verbindung mit den elektrischen Vorstellungen zu vermeiden, indem sie an allen diesbezüglichen Stellen eine nicht weiter vorstellbare Fernwirkung einschoben. FARADAY suchte die letztere durch „physische Kraftlinien", also durch eine der Materie des Zwischenraumes zugeteilte elektrische bezw. magnetische Rolle zu ersetzen. Die Vertreter der „Fernwirkung" haben zwar versucht, FARADAYS Auffassung als gar nicht so verschieden von der Fernwirkungstheorie hinzustellen, da er eine Fernwirkung von Molekül zu Molekül annehmen müsse (vgl. HOPPE, § 258). Abgesehen davon, dass für die Vorstellung hierin doch wohl ein wesentlicher Unterschied liegen dürfte, kann man aus seinen Auslassungen diese Fernwirkung zwischen Molekülen eigentlich nicht herauslesen, da er sich gegen die gewöhnliche Atomvorstellung als harter, in gewissen Abständen voneinander angeordneter Partikelchen ausdrücklich verwahrt. Diese — wie es scheint weniger bekannte — Stelle ist sowohl für die bei den neueren Hülfsvorstellungen nicht gut zu umgehenden Atomvorstellungen sehr wichtig, als auch in anderer (erkenntnistheoretischer) Beziehung heute von noch aktuellem Interesse und mutet sehr modern an. Als Ergänzung zu der früher (**54**) angeführten Äusserung und zur Charakterisierung von FARADAYS kritischer Denkweise sei hier ausdrücklich darauf hingewiesen („Über elektrische Leitung und die Natur der Materie", FARADAYS Werke von KALISCHER übersetzt, Band II, 260 u. ff.).

Wie wir heute wissen, ist die Analogie zwischen dem Gravitationsgesetz NEWTONS und COULOMBS Gesetz über die ponderomotorischen Wirkungen des Magnetismus und der Elektrizität beschränkter als von den früheren Vertretern der Fernwirkungstheorie angenommen wurde. Ja gerade die Unvollständigkeit der Fassung aller vermeintlichen Fernwirkungsgesetze auf elektromagnetischem Gebiet und die Notwendigkeit der Hinzufügung eines auf das Zwischenmedium bezüglichen Faktors, sowohl bei dem Gesetz COULOMBS als auch bei demjenigen von BIOT-SAVART, bedingten die neueren Auffassungen und Hülfsvorstellungen, welche die Entwickelung der Erkenntnis zur Folge hatten, dass der Schwerpunkt der ganzen Erscheinung, soweit der Sitz der Energie in Frage kommt, gerade in jenem von der Fernwirkungstheorie übersprungenen Zwischenmittel liege. Die Ausbildung der heutigen Feldvorstellungen auf der Grundlage der Vorstellungen von FARADAY, der zuerst in seinem „elektrotonischen Zustand" (beim elektro-magnetischen Feld) und seiner „successiven Polarisation" (beim elektrostatischen Feld) das Vorhandensein eines solchen Feldes und später im Anschluss an die experimentelle Ermittelung des Verlaufes der Kraftlinien die Wichtigkeit eines solchen in Gestalt der „physischen Kraftlinien" nachwies, verdankt sonach ihren Ursprung der Erkenntnis jener Analogiegrenze zwischen den Gravitations- und den magnet-elektrischen Erscheinungen. Auch hier seien deshalb nochmals die Worte einer zusammenfassenden Abhandlung FARADAYS aus dem Jahre 1852 „Über die physischen Magnetkraftlinien" (vgl. Exp. Res. III, 401) angeführt, welche jene wichtige Unterscheidung charakterisieren und zugleich die Grundlage unserer heutigen auf das Gebiet des Magnetismus und der Elektrostatik erweiterten Kreislaufvorstellungen enthalten:

Manche Kräfte wirken offenbar in die Ferne; ihre physische Natur ist uns unbegreiflich; dennoch erkennen wir vieles, was an ihnen reell und positiv gewiss ist, unter anderem einen gewissen Zustand des Raumes zwischen dem wirkenden Körper und dem, welcher die Wirkung erleidet, oder zwischen den zwei aufeinander wirkenden Körpern. Solche Kräfte äussern sich in den Erscheinungen der Gravitation, des Lichtes, der Elektrizität, des Magnetismus u. s. w. Bei näherer Untersuchung findet man hinsichtlich ihrer respektiven Kraftlinien bemerkenswerte Verschiedenheiten; dass sie jedoch in gewissen Fällen das Dasein wirklicher physischer Linien beweisen, wird die Betrachtung dieser Frage in Betreff des Magnetismus erleichtern.

Wenn zwei Körper, a und b, gegen einander gravitieren, so ist die Richtung, in welcher sie wirken, eine gerade Linie, denn einer solchen würden sie folgen, wenn sie frei beweglich wären. Die anziehende Kraft wird nicht geändert, weder in Richtung noch in Grösse, wenn ein dritter Körper hinzutritt, der durch seine Gravitation oder sonst wie auf einen der ersteren oder auf beide Körper wirkt. Ein balanzierter Messingcylinder gravitiert mit genau demselben Gewicht gegen die Erde, gleichviel ob er wie ein Pendel frei herabhängt oder durch andere Anziehungskräfte oder durch Spannung seitwärts gezogen wird, wie gross auch immer letztere sein mögen. Eine auf a ausgeübte neue Gravitationskraft beeinflusst nicht im mindesten den Betrag der Kraft, die auf b ausgeübt wird. Wir haben keinen Beweis, dass die Äusserung dieser Kraft, wie gross auch die Entfernung zwischen den aufeinander wirkenden Körpern ist, sei es die Entfernuug zwischen Sonne und Erde oder zwischen Fixsternen, Zeit erfordert. Wir können uns diese Kraft kaum durch ein einzelnes Teilchen für sich vorstellen; erst durch die Gegenwart von zweien oder mehreren wird sie uns fasslich; mit dieser Vorstellung verknüpfen wir jedoch keine Wahrnehmung eines Unterschiedes in dem Charakter der Kraft in den verschiedenen Teilchen; die Wirkung aller gleichartigen Teilchen erkennen wir als gleichwertig, gegenseitig und gleich. In Bezug auf die Gravitation kennen wir keinen Vorgang, der uns zu der Vorstellung einer für sich bestehenden, physischen Kraftlinie brächte, und soviel wir bisher wissen, ist die Gravitationslinie bloss eine ideale Linie, welche die Richtung darstellt, in der die Kraft wirkt.

Nehmen wir eine andere Kraftwirkung der Sonne, welche diese gegen die Erde ausübt, ihre leuchtende oder erwärmende Kraft. Strahlen (das sind Kraftlinien) durchsetzen den dazwischen liegenden Raum; diese Linien können wir jedoch durch verschiedene in ihre Bahn gestellte Media beeinflussen. Wir können ihre Richtung durch Reflexion oder Brechung ändern; wir können bewirken, dass sie in krummen oder gebrochenen Bahnen fortgehen. Wir können sie an ihrem Ursprungsort abschneiden und sie dann auffinden, ehe sie ihr Ziel erreicht haben. Sie stehen in Beziehung zur Zeit und brauchen 8 Minuten, um von der Sonne zur Erde zu gelangen, sodass sie für sich, unabhängig von ihrer Quelle oder ihrem schliesslichen Heim, bestehen können und eine deutlich bestimmte physische Existenz haben. Sie stehen in dieser Beziehung, sowie auch in Betreff ihres Zustandes an ihrem Endziel in vollstem Gegensatz zu den Linien der Schwerkraft. Die beiden Körper, welche die Grenzen einer Schwerkraftslinie bilden, sind in diesen ihren Wirkungen in jeder Hinsicht gleich, und so ist auch die Beziehung ihrer Verbindungslinie in beiden Richtungen gleich. Zwei Körper, welche die Grenzen eines Lichtstrahls bilden, haben in Beziehung zu demselben eine völlig verschiedene Wirkung; der eine ist eine Quelle, der andere ein Zerstörer der Linie, und die Linie selbst verhält sich wie ein Strom, der in einer bestimmten Richtung fliesst. In diesen beiden Fällen, der Gravitation und der Strahlung, ist der Unterschied zwischen einer abstrakten und einer physischen Kraftlinie unmittelbar einleuchtend.

Wenden wir uns zur statischen Elektrizität, so finden wir hier Anziehungen (und andere Wirkungen) in die Ferne wie in den vorigen Beispielen; vergleichen wir aber diese Anziehung mit der der Schwere, so zeigen sich uns auffallende Unterschiede, welche unmittelbar die Frage nach der Existenz physischer Kraftlinien treffen. Zunächst finden wir zwar auch hier, dass die Wirkung der Körper, welche die Grenzen oder Endigungen der Anziehungslinien bilden, wechselseitig und gleichwertig ist, aber sie verhalten sich nicht gleich; im Gegenteil befinden sie sich, obschon jeder von ihnen, allgemein gesprochen, mit einer Kraft von gleicher Natur begabt ist, dennoch in solchem Gegensatze zu einander, dass ihre Wirkungen auf einen dritten Körper in einem dem ihrigen gleichen Zustande einander genau umgekehrt sind: was der eine anzieht, stösst der andere ab; die Kraft selbst offenbart sich als Äusserungen eines Agens von dualer und antithetischer Beschaffenheit. Nun kann bei solchen dualen Agentien niemals Anziehung stattfinden, wenn nicht die beiden Zustände von genau gleichem Betrage sein müssen, nicht bloss

was ihre Anziehungswirkung betrifft, sondern auch in jeder anderen Hinsicht; denn es ist unmöglich eine Anordnung zu treffen, die es gestattete, mehr Elektrizität der einen Art in die Erscheinung zu rufen oder zu entwickeln, als von der anderen Art. Eine fernere Schranke ist, dass sie in physikalischer Beziehung zu einander stehen müssen, und dass diese, wenn eine positiv und eine negativ elektrisierte Fläche derart mit einander kombiniert sind, nicht anders aufgehoben werden kann, als durch Fortleitung dieser Oberflächenkräfte zu gleich grossen aber entgegengesetzten Kräften, die irgendwo sonst erregt worden sind. Eine weitere Beschränkung ist, dass der Betrag der Kraft begrenzt ist. Wenn eine Kugel a mit 10 Einheiten positiver Elektrizität geladen ist, so kann sie mit diesem Kraftbetrage auf eine mit 10 Einheiten negativer Elektrizität geladene Kugel b wirken; nimmt man ersterer jedoch 5 Einheiten mittels eines dritten Körpers c, der mit negativer Elektrizität geladen ist, so kann dieser bloss mit 5 Einheiten auf die Kugel a wirken, und diese Kugel muss anderweitig 5 positive Einheiten finden oder entwickeln. Nichts dergleichen geschieht bei der Gravitation, die vielmehr eine Kraft ist, welche nichts von einer Dualität an sich hat. Endlich wirkt die elektrische Kraft in krummen Linien. Befindet sich eine abgeleitete runde Metallplatte einer positiv elektrisierten und in freier Luft isolierten Kugel gegenüber in einem Abstande von 12 bis 15 Zoll, so wird erstere aus oben erwähntem Grunde notwendig einen negativen Zustand annehmen; die Platte ist jedoch nicht bloss an der der Kugel zugewandten Seite negativ, sondern auch an der anderen, der Aussenfläche, wie sich mittels eines Probescheibchens oder eines von dieser Fläche herabhängenden Streifens von Gold- oder Silberblatt zeigen lässt. Nun geht aber die auf diese Fläche wirkende Kraft nicht durch die abgeleitete Platte hindurch — denn das dünnste Goldblättchen vermag die Induktionswirkung zu hemmen —, sondern rings um den Rand der Fläche, und wirkt somit in krummen Linien. Alle diese Erscheinungen weisen auf die Existenz physischer Kraftlinien hin; die absolut wesentliche Beziehung positiver und negativer Flächen zu einander, ihre Abhängigkeit von einander gegenüber der bekannten Beweglichkeit der Kräfte lassen keinen anderen Schluss zu. Auch die Wirkung in krummen Linien muss von physischen Kraftlinien bedingt sein. Endlich führt eine dritte wichtige Eigenschaft der Kraft zu demselben Resultat, nämlich die Einwirkung, welche sie durch Media von verschiedener spezifischer Induktionskapazität erleidet.

Gehen wir zur dynamischen Elektrizität über, so erweist sich das Dasein von physischen Kraftlinien noch weit deutlicher. Eine VOLTAsche Batterie, deren Enden durch ein leitendes Medium mit einander verbunden sind, liefert ein Etwas, was man einen Kraftstrom genannt hat, der die Kette durchläuft, aber dieser Strom ist eine Kraftachse von gleichen und entgegengesetzten Eigenschaften in entgegengesetzten Richtungen. Er besteht aus Kraftlinien, welche sich gemäss der Querwirkung des Leiters, deren Richtung sich mit der Form des Leiters ändert, zusammendrängen oder ausweiten, sich an jeder Stelle des Leiters vorfinden und jeder Stelle desselben durch geeignete Kanäle entnommen werden können, und niemand zweifelt, dass dies physische Kraftlinien sind.

Was endlich einen Magnet betrifft, der das Ziel dieser Diskussion ist, so stellt er in sich selbst ein vollkommenes Kräftesystem dar, das also durch seine eigenen wechselseitigen Beziehungen zu existieren vermag. Es hat den dualen und antithetischen Charakter, der der statischen sowohl als der dynamischen Elektrizität zugehört, und der sich in dem offenbart, was man die Polaritäten des Magnets nennt, also durch die entgegengesetzten Eigenschaften ähnlicher Natur an seinen Enden und in der Nähe derselben. Diese Kräfte zeigen sich absolut gleich gross; der Betrag der einen kann nicht geändert werden ohne eine entsprechende Änderung der anderen, und dies gilt nicht blos für die Polaritäten eines und desselben Magnets, sondern auch für die Beziehungen eines Magnets zu anderen Magneten. Die Polaritäten oder der Nordmagnetismus und Südmagnetismus eines Magnets stehen nicht blos durch den Magnet selber oder innerhalb desselben zu einander in Beziehung, sondern auch nach aussen zu entgegengesetzten Polaritäten (nach Art der elektrostatischen Induktion); anders können sie überhaupt nicht existieren. Diese äussere Beziehung hat die Bedeutung, dass sie notwendig eine genau gleiche Stärke der neuen, denen des Magnets entgegengesetzten Polaritäten fordert. Wenn also die Kraft eines Magnets a zu der eines zweiten Magnets b in Beziehung gesetzt wird, so kann er nicht auf einen dritten Magnet c wirken, ohne b einen seiner Wirkung auf c entsprechenden Wirkungsbetrag zu entziehen. Durch den bewegten Draht lässt sich zeigen, dass die Kraftlinien sowohl innerhalb als ausserhalb des Magnets existieren, dass sie geschlossene Kurven bilden, deren Bahn an einer Stelle durch den Magnet geht; die Kraftmenge der im Innern des Magnets verlaufenden Linien an seinem Äquator ist genau gleich der Kraftmenge in irgend einem durch die Gesamtheit der ausserhalb

verlaufenden Linien gelegten Querschnitt. Die Richtung der ausserhalb eines Magnets verlaufenden Linien kann durch mannigfache Media, die in ihre Bahn gestellt werden, geändert werden. Wir können uns durchaus keinen Magnet mit nur einer Art des Magnetismus oder mit dem geringsten Überschuss des Nordmagnetismus über den Südmagnetismus oder umgekehrt herstellen. Werden die Polaritäten eines Magnets nicht nach aussen hin in Beziehung gesetzt zu den Kräften anderer Magnete, so stehen sie zu einander in Beziehung, d. h. der Nordmagnetismus und Südmagnetismus eines einzelnen Magnets bedingen und erhalten sich gegenseitig.

Alle diese Thatsachen und viele andere weisen auf die Existenz physischer Kraftlinien sowohl ausserhalb als innerhalb des Magnets hin. Sie bilden sowohl krumme als gerade Linien; denn bei einem geraden Magnetstab oder besser noch bei einer runden Stahlscheibe, die regelmässig magnetisiert ist, so dass ihre magnetische Achse mit einem Durchmesser zusammenfällt, müssen die Polaritäten aussen offenbar durch krumme Kraftlinien zu einander in Beziehung stehen, da eine Gerade zwei Punkte mit Nord- und Südmagnetismus nicht mit einander verbinden kann. Krumme Kraftlinien aber können, glaube ich, nur solche sein, die eine physische Existenz haben.

Diesen Schluss bekräftigen auch die mit dem bewegten Draht erhaltenen Erscheinungen. Wird der Draht quer zu den Kraftlinien bewegt, so durchläuft ihn ein elektrischer Strom oder sucht ihn zu durchlaufen, während, ehe der Draht in Bewegung gesetzt wird, kein Strom vorhanden ist. In dem ruhenden Draht zirkuliert kein Strom; und wenn er bewegt wird, so braucht er nicht zu Orten grösserer oder kleinerer magnetischer Kraft zu gehen, sondern er kann sich in einer solchen Bahn bewegen, dass eine Magnetnadel, die in derselben Bahn hingeführt würde, magnetisch völlig unbeeinflusst bliebe, d. h. es würde gar keinen Unterschied machen, ob die Magnetnadel bewegt würde oder nicht. Man kann es so einrichten, dass der ruhende Draht dieselbe diamagnetische Kraft habe wie das den Magnet umgebende Medium und so in keiner Weise die durch beide gehenden Kraftlinien störe, und dennoch entsteht ein Strom in dem Draht, sobald er bewegt wird. Die Bewegung an und für sich kann den Strom nicht hervorbringen; sondern es musste ringsum den Magnet ein Zustand bestanden haben und durch ihn unterhalten worden sein, in dessen Bereich sich der Draht befand, und dieser Zustand weist auf die physische Konstitution der magnetischen Kraftlinien hin.

Was das für ein Zustand ist, oder wovon er bedingt ist, lässt sich vorläufig nicht sagen. Er kann wie ein Lichtstrahl vom Äther bedingt sein, und es ist ja auch bereits ein Zusammenhang zwischen Licht und Magnetismus dargethan worden. Es kann ein Spannungszustand oder ein Schwingungszustand oder am Ende ein dem elektrischen Strome analoger Zustand sein, zu dem die magnetischen Kräfte in inniger Beziehung stehen. Ob er zu seiner Erhaltung notwendig Materie erfordert, wird davon abhängen, was man unter dem Ausdruck Materie versteht. Beschränkt man ihn auf ponderable oder der Schwere unterworfene Substanzen, dann ist Materie für die physischen magnetischen Kraftlinien nicht wesentlicher als für einen Licht- oder Wärmestrahl; wenn wir aber den hypothetischen Äther als eine Art von Materie auffassen, so können die Kraftlinien von irgend einer Funktion desselben abhängen. Erfahrungsgemäss ist der leere Raum magnetisch; man muss jedoch annehmen, dass er von Äther erfüllt sei, wenn man diese Vorstellung überhaupt zulässt; oder wenn man sich einst eine andere Vorstellung von dem Zustande oder der Beschaffenheit des leeren Raumes bilden sollte, so muss er an die Stelle dessen treten, was man jetzt auf Grund der Erfahrung leeren Raum nennt. Übrigens ist es, glaube ich, eine feststehende Thatsache, dass ponderable Materie für die Existenz physischer Magnetkraftlinien nicht wesentlich ist.

Welche wissenschaftliche That in dieser Bekämpfung der damals nun einmal anerkannten Fernwirkungen lag, geht aus folgender, im Jahre 1855 geschriebenen Stelle hervor (Exp. Res. Bd. III, 525):

Jetzt sind wir gewöhnt, Wirkungen in merkliche Fernen, wie beispielsweise die eines Magnets auf einen anderen, oder der Sonne auf die Erde, zuzugestehen, als ob mit einer derartigen Annahme jede Frage nach der Natur der physischen Mittel, vermöge welcher Körper aufeinander in die Ferne wirken, vollkommen beantwortet wäre; ja wer in die Zulänglichkeit dieser Antwort oder der Hypothese, auf welche sie sich gründet, Zweifel setzt, und eine befriedigendere Erklärung verlangt, läuft einigermassen Gefahr, vor der wissenschaftlichen Welt lächerlich oder unwissend zu erscheinen. Allein NEWTON, der für den Nachweis des Gesetzes über die Fernwirkung der Körper, mit Einschluss der

Sonne und des Saturn, deren Abstand voneinander 900 Millionen Meilen beträgt, mehr gethan hat als irgend einer, verlässt seinen Gegenstand nicht, ohne sein wohlbedachtes Urteil auszusprechen, dass die Idee der Anziehung voneinander entfernter, materieller Massen für sich den philosophisch Denkenden nicht befriedigen könne. Dass die Schwere der Materie eingeboren, immanent und wesentlich sei, so dass ein Körper auf einen anderen durch ein Vakuum in die Ferne wirken könne, ohne Vermittelung von irgend etwas, vermöge dessen und durch welches ihre Wirkung und Kraft von dem einen auf den anderen übertragen werde, ist, wie er sagt, eine grosse Ungereimtheit. Die Schwere muss beständig durch ein Agens nach gewissen Gesetzen bewirkt werden; ob dieses Agens jedoch materiell oder immateriell sei, überlässt er der Überlegung seiner Leser. Dies ist der weitblickende Gedanke eines Mannes, der vermöge seines Wissens und seiner Geisteseigenschaften in dem Diamant eine coagulierte, ölige Substanz sah, zu einer Zeit, als man ihn nur als durchsichtigen Stein kannte, und der ein Jahrhundert bevor Wasser zersetzt oder der Wasserstoff entdeckt worden war, das Dasein einer brennbaren Substanz im Wasser voraussagte.

62. Faradays und Maxwells Stellung zu den Hülfsvorstellungen.

Die weitere Entwickelung der elektromagnetischen Wissenschaft hat Faraday in allen wesentlichen Punkten Recht gegeben und gezeigt, dass für die Forderung einer weitergehenden Analogie die älteren Theorien bezw. Hülfsvorstellungen auf Grund der Kritik Faradays unhaltbar sind. Es bekundet aber eine bemerkenswerte Enthaltsamkeit, wenn Faraday sich damit begnügt, die physische Existenz des „Feldes“, wie wir heute allgemein ein von „Kraftlinien“ durchsetztes Gebiet bezeichnen, nachzuweisen, ohne einen weiteren Ausbau mechanischer Hülfsvorstellungen vorzunehmen, oder richtiger gesagt, zu veröffentlichen, da er für seine Person sich vermutlich dieses Hülfsmittels der mechanischen Analogievorstellungen in ausgeführterer Form bedient hat. Der Grund hierfür lag wahrscheinlich zum Teil in der ihm eigenen vorsichtigen Forschungsweise, überwiegend wohl aber in dem Zweifel, ob für seine Zeit die Nachteile einer neuen „Hypothese“ nicht ihre Vorteile überwogen haben würden. Seine Erfahrung (vgl. **54**), dass es damals in weiten wissenschaftlichen Kreisen an einer hinreichenden Trennung von Erfahrungsthatsachen und Hülfsvorstellungen mangelte, welche beiden Wissensgebiete er selbst richtig als gleichsam von verschiedener Dimension behandelt wissen wollte, mag ihn wohl von der Aufstellung neuer Hülfsvorstellungen zu allgemeinem Gebrauch abgehalten haben. Die Neigung der damaligen Zeit, diesen an sich äusserst wichtigen Hülfsmitteln eine falsche Bedeutung zuzuschreiben, d. h. sie unter dem Namen von Theorien ihres Analogiecharakters zu entkleiden und mit den Erfahrungsthatsachen in oft unheilvoller Weise zu vermengen, war ihm nachdrücklich zum Bewusstsein gelangt bei den älteren als unhaltbar erkannten Fluidumsvorstellungen in ihren verschiedenen Variationen. Charakteristisch hierfür und gleichzeitig für seine eigenen Forschungsnormen erscheint die Thatsache, dass er wiederholt die Enthaltsamkeit Newtons bei Auffindung des Gravitationsgesetzes und Aragos bei der Entdeckung der Erscheinungen des sogenannten Rotationsmagnetismus als echt philosophisch rühmt, weil sie es vermochten, zur weiteren „Erklärung“ die Aufstellung einer voreiligen Hypothese zu unterlassen. Es erklärt sich wohl hieraus, wenn unter diesen Umständen der Eindruck der Gefährlichkeit solcher „Hypothesen“ ihn stärker beeinflusste, als der von ihm anerkannte Vorteil derselben als wissenschaftliches Anregungsmittel; auch trat damals ihr gedankenökonomischer Wert für gewisse Gebiete, namentlich für die praktischen Verwendungen noch nicht in so starkem Masse hervor. Denn auch in dieser Hinsicht ist der Umstand nicht zu vergessen, dass die Wertschätzung aller wissenschaftlichen Hülfsmittel von

den mit der Zeit wechselnden Bedürfnissen in hohem Grade abhängig ist, ein Punkt, der stets zu berücksichtigen bleibt, wenn man eine gegenwärtige oder nachträgliche ungerechte Beurteilung der Hülfsmittel, wie Theorien, Vorstellungen und der von ihnen ausgegangenen Anregungen vermeiden will. FARADAYS Bestreben, keine über die nackten Thatsachen hinausgehende Hypothese zu machen, lässt ihn geistig nahe verwandt mit modernen Erkenntnistheoretikern erscheinen.

FARADAY in dieser Hinsicht gleichfalls nahe verwandt, wenn auch in anderer Hinsicht von ihm sehr verschieden und gleichsam zu ihm als Experimentator die mathematische Ergänzung bildend, war MAXWELL, der in Anknüpfung an die letztgenannten Arbeiten FARADAYS (1852—1855) in dem Jahre 1855 seine erste, für die theoretische Elektrizitätslehre so bedeutsame Abhandlung: „Über FARADAYS Kraftlinien" veröffentlichte (vgl. OSTWALDS Klassiker No. 69, herausgegeben von BOLTZMANN). Auch er steht in dieser Abhandlung noch ganz auf dem Boden FARADAYS, wonach die weiteren Ausführungen mechanischer Hülfsvorstellungen wegen ihrer Gefährlichkeit der Ablenkung nach Möglichkeit zu vermeiden wären. In seiner anschliessenden Schrift: „Über Physikalische Kraftlinien" hat er diese Ansicht, anderen geistigen Bedürfnissen folgend, verlassen und die noch weiter zu behandelnden „grob sinnlichen" — wie sie von seiten anderer Physiker genannt worden sind — Vorstellungen zur Ableitung seiner berühmten Gleichungen verwendet. Wenn er dieselben auch später nach Erreichung seines Zweckes nicht weiter betont hat, so dass dieselben in seinem bekanntesten Hauptwerk („Treatise on Electricity") gar nicht mehr zu finden sind, so bleibt bezüglich der Frage gewisser geistiger Bedürfnisse doch immerhin bemerkenswert, dass gerade diese „grob sinnlichen" Vorstellungen den Ausgangspunkt von MAXWELLS Erfolg bilden, der ohne ihre Hülfe trotz aller mathematischen Genialität nicht erreichbar gewesen wäre, weil eine anderweitig unersetzbare Seite der Einsicht gemangelt hätte. Wenn jetzt der Kundige von oben herab eine Begehbarkeit des Steilweges auch ohne jene Hülfsvorstellungen ausfindig macht, so dürfte deshalb ihr Nutzen für die Allgemeinheit noch lange nicht illusorisch sein.

63. Grundlage zu Maxwells Theorie.

Für ein besseres Verständnis MAXWELLS und seiner Leistungen, zugleich auch für die heutige Elektrizitätstheorie, sowie überhaupt für die Stellung moderner wissenschaftlicher Auffassung, als deren Bahnbrecher MAXWELL mit wirksam war, ist die Einleitung zu seiner ersten Schrift („Über FARADAYS Kraftlinien") so bedeutsam, dass sie in ihren wichtigsten Teilen hier in der Übersetzung BOLTZMANNS folgen möge[1]:

Der gegenwärtige Stand der Elektrizitätslehre scheint besonders ungünstig für die Spekulation. Die Gesetze der Verteilung der Elektrizität auf der Oberfläche von Leitern sind durch Rechnung aus Experimenten abgeleitet worden. In einigen Teilen der mathematischen Theorie des Magnetismus ist man ziemlich weit gekommen, während in anderen die experimentellen Daten mangeln. Die Gesetze der Leitung des galvanischen Stromes und der Wechselwirkung der Stromleiter sind durch mathematische Formeln dargestellt

---

1) Es schien dem Herausgeber aus verschiedenen Gründen unangebracht, auf diese wichtige Auslassung MAXWELLS ebenso wie auf die beiden obigen FARADAYS hier nur zu verweisen, oder bei ihrer Gedankenfülle sie durch ein Referat wiedergeben zu wollen, um so mehr, da sie als Ergänzung einerseits der einleitenden Ausführungen (vgl. 44 und ff.), andererseits der Elektrizitätstheorie MAXWELLS (vgl. H. I, 3) für die Leser von Wert sein dürfte.

worden, aber sie stehen noch ausser aller Beziehung zu den anderen Teilen der Wissenschaft. Will man daher gegenwärtig eine Theorie der Elektrizität und des Magnetismus aufstellen, so muss dieselbe, wenn sie erschöpfend sein soll, in die Beziehungen zwischen statischer und strömender Elektrizität, sowie auch zwischen den Anziehungen und den Induktionswirkungen in beiden Zuständen Einsicht gewähren. Ferner muss sie diejenigen Gesetze, deren mathematische Form bekannt ist, in Übereinstimmung mit den bisherigen Theorien liefern und zudem die Berechnung jener Übergangsfälle ermöglichen, in denen die bekannten Formeln nicht anwendbar sind.

Um den Anforderungen der bisherigen Theorien gerecht zu werden, muss man sich mit einem bedeutenden Apparate so verwickelter mathematischer Formeln vertraut machen, dass die Schwierigkeit, diese im Gedächtnisse festzuhalten, allein schon den weiteren Fortschritt wesentlich beeinträchtigt. Wollen wir daher die Theorie erfolgreich weiter entwickeln, so müssen wir vor allem die Ergebnisse der früheren Untersuchungen vereinfachen und auf eine dem Verstande möglichst leicht zugängliche Form bringen. Die Resultate dieser Vereinfachung können entweder die Gestalt einer rein mathematischen Formel oder die einer physikalischen Hypothese annehmen. Im ersten Falle verlieren wir die zu erklärenden Erscheinungen ganz aus dem Auge und können niemals eine umfassendere Übersicht über die inneren Beziehungen des Gegenstandes gewinnen, wenn wir auch die Folgerungen aus gegebenen Gesetzen zu berechnen vermögen. Wenn wir andererseits eine physikalische Hypothese wählen, so sehen wir die Erscheinungen wie durch eine gefärbte Brille und sind zu jener Blindheit gegen Thatsachen und Voreiligkeit in den Annahmen geneigt, welche eine auf einem einseitigen Standpunkt stehende Erklärung begünstigt. Wir müssen daher eine Untersuchungsmethode ausfindig machen, welche uns bei jedem Schritte zu einer klaren physikalischen Anschauung befähigt, ohne uns an eine spezielle Theorie zu binden, von welcher diese Anschauung entlehnt ist, damit wir weder durch die Verfolgung analytischer Subtilitäten vom Gegenstande abgezogen, noch durch eine Lieblingshypothese von der Wahrheit entfernt werden.

Um physikalische Vorstellungen zu erhalten, ohne eine spezielle physikalische Theorie aufzustellen, müssen wir uns mit der Existenz physikalischer Analogien vertraut machen. Unter einer physikalischen Analogie verstehe ich jene teilweise Ähnlichkeit zwischen den Gesetzen eines Erscheinungsgebietes mit denen eines anderen, welche bewirkt, dass jedes das andere illustriert. Auf diese Art sind alle Anwendungen der Mathematik in der Wissenschaft auf Beziehungen zwischen den Gesetzen der physikalischen Grössen zu denen der ganzen Zahlen gegründet, so dass das Streben der exakten Wissenschaft darauf gerichtet ist, die Probleme der Natur auf die Bestimmung von Grössen durch Operationen mit Zahlen zurückzuführen. Gehen wir von der allgemeinsten Analogie zu einer sehr speziellen über, so finden wir formal die vollste Übereinstimmung zwischen den Gesetzen zweier verschiedener Erscheinungsgebiete, von denen ein jedes Ausgangspunkt einer physikalischen Theorie des Lichtes wurde.

Die Richtungsänderungen, welche die Lichtstrahlen beim Übergange von einem Medium in ein anderes erfahren, sind identisch mit den Abweichungen eines Massenteilchens von der geradlinigen Bahn, wenn sich dasselbe durch eine dünne Schicht bewegt, in der intensive Kräfte wirken. Auf diese Analogie, welche sich nur auf die Richtung, nicht aber auf die Geschwindigkeit der Bewegung erstreckt, beruht eine Erklärung der Brechung des Lichtes, welche lange für die richtige gehalten wurde und noch heute, wo wir nicht mehr Gefahr laufen, sie ausserhalb ihres Gültigkeitsbereichs anzuwenden, bei der Lösung verschiedener Probleme als mathematischer Kunstgriff von Nutzen ist. Die zweite Analogie zwischen dem Lichte und den Schwingungen eines elastischen Mediums erstreckt sich viel weiter, aber obwohl ihre Wichtigkeit und Fruchtbarkeit nicht genug geschätzt werden kann, so müssen wir doch dessen eingedenk bleiben, dass sie nur auf einer formalen Ähnlichkeit zwischen den Gesetzen der Lichterscheinungen und denen der elastischen Schwingungen beruht. Wenn wir sie ihres physikalischen Gewandes entkleiden, so reduziert sie sich auf eine Theorie transversaler Zustandsänderungen und es bleibt ein System von Wahrheiten übrig, welches zwar den beobachteten Thatsachen nichts Hypothetisches hinzufügt, aber dafür wahrscheinlich sowohl an Anschaulichkeit als auch an Fruchtbarkeit in der Anwendung zurücksteht. Was ich über die schon so oft kritisierten Fragen der Optik gesagt habe, soll nur als Vorbereitung zur Diskussion der fast allgemein ohne weitere Kritik angenommenen Theorie der Fernwirkung dienen.

Wir haben uns alle an den mathematischen Begriff dieser Fernwirkung gewöhnt. Wir können daraus Schlüsse ziehen und die betreffenden Gesetze in Formeln fassen, welche eine bestimmte mathematiche Bedeutung haben und in voller Übereinstimmung mit den

Naturerscheinungen stehen. Ja, es giebt in der angewandten Mathematik keine Formel, die mit der Natur besser stimmen würde, als das NEWTONsche Gravitationsgesetz, und keine Theorie hat im menschlichen Geiste fester Wurzel gefasst als die der Fernwirkung der Körper. Die Gesetze der Wärmeleitung in homogenen Medien erscheinen auf den ersten Anblick in physikalischer Hinsicht denkbarst verschieden von denen der Anziehungen. Die Grössen, welche bei dem zweiten Probleme vorkommen, sind: Temperatur, Wärmefluss, Leitungsfähigkeit. Das Wort Kraft ist dem Gegenstande fremd; trotzdem finden wir, dass die mathematischen Gesetze der stationären Bewegung der Wärme in homogenen Mitteln der Form nach identisch sind mit denen einer Anziehung, welche dem Quadrate der Entfernung verkehrt proportional ist. Wenn wir Wärmequelle statt Anziehungszentrum, Wärmefluss statt beschleunigende Kraft der Anziehung, und Temperatur statt Potential setzen, so verwandeln wir die Lösung eines jeden Problems der Anziehungslehre in die eines Problems der Lehre der Wärmeleitung.

Diese Analogie zwischen den Formeln der Wärme und Anziehungslehre wurde, wie ich glaube, zuerst vom Professor WILLIAM THOMSON (Cambr. Math. Journal, Bd. III, Febr. 1842. pap. on electrostat. a. magn. S. 1) betont.

Obwohl, wie man allgemein voraussetzt, die Wärmeleitung durch eine Wirkung zwischen den unmittelbar benachbarten Teilen der Körper zu stande kommt, während die Anziehungskraft eine Beziehung zwischen entfernten Körpern ist, so sind doch die mathematischen Formeln, durch welche die Gesetze des einen und des anderen Erscheinungsgebietes ausgedrückt werden, vollständig dieselben. Freilich gewinnen, wenn wir weitere Thatsachen in den Kreis unserer Betrachtung ziehen, beide Gegenstände ein sehr verschiedenes Ansehen, aber die mathematische Verwandtschaft bleibt bei einer ganzen Reihe ihrer Gesetze bestehen und kann mit Vorteil verwendet werden, um aus bekannten Lösungen von Aufgaben des einen Gebietes die des anderen abzuleiten. Durch den Gebrauch von Analogien dieser Art habe ich versucht, in einer bequemen und handlichen Form jene mathematischen Formeln darzustellen, welche zum Studium der elektrischen Erscheinungen notwendig sind. Meine Methode ist durchweg die von FARADAY in seinen Untersuchungen befolgte, welche man, obwohl sie von Professor THOMSON und anderen mathematisch interpretiert worden ist, doch noch sehr häufig für unbestimmter und unmathematischer hält, als die der Mathematiker von Fach ....

Ich habe an erster Stelle den Begriff der Kraftlinien zu erklären und zu erläutern. Wenn ein Körper in gegebener Weise elektrisiert ist, so wird ein kleiner, mit positiver Elektrizität geladener Körper in jeder gegebenen Lage in der Nähe des ersten Körpers eine Kraft erfahren, die ihn nach einer bestimmten Richtung treibt. Wenn der kleine Körper gleichstark negativ elektrisiert ist, wird er durch eine gleiche Kraft gerade nach der entgegengesetzten Richtung getrieben. Genau in derselben Beziehung steht ein magnetischer Körper zum Nord- oder Südpol eines kleinen Magnets. Wenn der Nordpol nach der einen, so wird der Südpol gerade nach der entgegengesetzten Richtung getrieben.

Wir können daher durch jeden Punkt des Raumes eine Linie so ziehen, dass sie die Richtung der elektrischen oder magnetischen Kraft, d. h. der Kraft, welche daselbst auf ein positiv elektrisiertes Teilchen oder auf einen punktförmigen Nordpol wirkt, darstellt, oder auch die umgekehrte Richtung der Kraft auf ein negativ elektrisiertes Teilchen oder einen Südpol. Da dies für jeden Punkt des Raumes gilt, so können wir, von irgend einem Punkte ausgehend, eine Linie so ziehen, dass ihre Richtung in jedem ihrer Punkte mit der elektrischen oder magnetischen Kraft in diesem Punkte zusammenfällt. Diese Kurve wird für jeden ihrer Punkte die Richtung dieser Kraft anzeigen und sie mag deshalb Kraftlinie heissen. Wir können in derselben Weise andere Kraftlinien ziehen, bis wir den ganzen Raum mit Kurven angefüllt haben, welche durch ihre Richtung die der Kraft in jedem beliebigen Punkte anzeigen.

Wir erhalten so ein geometrisches Modell der physikalischen Kräfte, welches uns allenthalben die Richtung der Kraft angiebt; aber es ist noch eine Methode notwendig, um auch die Intensität derselben in irgend einem Punkte auszudrücken. Letzteres gelingt, wenn wir diese Kurven nicht als blosse Linien, sondern als Röhren von veränderlichem Querschnitte betrachten, in denen eine unzusammendrückbare Flüssigkeit fliesst. Da die Geschwindigkeit einer solchen Flüssigkeit dem Querschnitte verkehrt proportional ist, so können wir bewirken, dass sie sich nach einem beliebigen gegebenen Gesetze ändert, indem wir den Querschnitt der Röhre entsprechend regulieren. Wir können also erzielen, dass die Flüssigkeitsströmung in diesen Röhren durch ihre Geschwindigkeit die Intensität

worden, aber sie stehen noch ausser aller [illegible] schaft. Will man daher gegenwärtig eine [illegible] aufstellen, so muss dieselbe, wenn sie [illegible] statischer und strömender Elektrizität [illegible] Induktionswirkungen in beiden Zust[illegible] Gesetze, deren mathematische Form [illegible] Theorien liefern und zudem die [illegible] die bekannten Formeln nicht an[illegible]

Um den Anforderungen [illegible] mit einem bedeutenden Appar[illegible] dass die Schwierigkeit, [illegible] Fortschritt wesentlich [illegible] entwickeln, so müssen [illegible] einfachen und auf [illegible] Resultate dieser Verei[illegible] Formel oder die [illegible] wir die zu erklären[illegible] fassendere Übersi[illegible] wir auch die Fol[illegible] andererseits [illegible] durch eine [illegible] in den [illegible] klärung [illegible] welche [illegible] uns [illegible] mit [illegible] noch [illegible]

[illegible] ist. Diese Methode der Dar[illegible] [illegible] einer in einer Röhre strömend[illegible] Kräften anwendbar; doch [illegible] [illegible]ktrischen und magnetischen [illegible] der Entfernung ver[illegible] [illegible] willkürlich ist, so [illegible] vorhanden sein; dagegen [illegible] [illegible] Falle möglich, [illegible]ssen. Die Röhrenwände [illegible] die Richtung der Bewegung [illegible]. Es war bisher üblich, die [illegible]etischen Kräfte von vornherein [illegible] [illegible] anziehende und abstossende Kräfte [illegible] Gegensatze hierzu wollen wir hier [illegible] schwierigen Untersuchungen passenderen Grösse und Richtung der Kraft, von der [illegible]wegungsrichtung einer unzusammendrück-

[illegible]retischen Ableitungen mit Hülfe des [illegible] Benutzung der experimentellen Ergeb- [illegible] [illegible]eiteten Kraftlinienbegriffes [illegible] nach dem [illegible] würde es an den meisten Stellen rich- [illegible] hat die Technik allgemein die von [illegible] beibehalten — schon einen wichtigen Teil [illegible] bekannten Formulierungen (vgl. letzten [illegible] mit der zweiten Arbeit: „Über physika- [illegible] No. 102), nicht nur alles Wesentliche der [illegible] auch in viel unmittelbarerer Form und [illegible] [illegible]ndlicheren Zusammenhang als in seinem [illegible], wenn man sich nicht nur auf das rein [illegible] ohne Kenntnis jener ausserordentlich er-

[illegible]genden Abschnitt eigentlich allein in Betracht [illegible] verschiedenen Stellen die mechanischen Hülfs- [illegible] nicht nur durch ihren innigen Zusammen-

[illegible] Übersetzer und Interpret, namentlich dieser ersten [illegible] erworben hat, bemerkt zu diesem zweiten und [illegible] MAXWELL's u. a. folgendes:

[illegible] Richtigkeit der MAXWELL'schen Gleichungen in den [illegible] erblicken oder [illegible] einer Ab- [illegible] aus dieser mechanischen Vorstellungen den Vorzug [illegible] Auffassung derselben als allgemeineren [illegible] HERTZ [illegible], welcher die Gleichungen gar [illegible] Beschreibungen der Thatsachen be- [illegible] Bei Ge- [illegible] Erklärung [illegible] MAXWELL [illegible] definitiv [illegible]

hang mit seinen berühmten Gleichungen (vgl. die Anmerkung BOLTZMANNS) das höchste geschichtliche Interesse beanspruchen können, sondern nach Ansicht des Verfassers für viele Zwecke der Elektrotechnik noch gegenwärtig praktischen, gedankenökonomischen Wert besitzen. Es möge daher zunächst unter möglichster Benutzung der eigenen Worte MAXWELLS (in der Übersetzung BOLTZMANNS) die Grundlage dieser allerdings mit der Zeit von MAXWELL selbst in einzelnen Punkten abgeänderten und auch nicht besonders konsequent verwendeten Vorstellungen angeführt werden, um anschliessend hieran unter etwas freierer Benutzung und weiterem Ausbau derselben die für die Elektrotechnik wichtigen Begriffe zu behandeln, sowie ihren Gebrauch bei einigen spezielleren Anwendungen zu zeigen. Alle weitergehenden analytischen Ableitungen würden aber an dieser Stelle zu vermeiden sein, da diese im letzten Abschnitte dieses Bandes behandelt werden, der in gewisser Hinsicht die mathematische Ergänzung zu den vorliegenden, die mechanische Seite der Analogie heraushebenden Hülfsvorstellungen bildet.

Als MAXWELL der physikalischen Seite des ihn anfänglich nur zu mathematischer Bebauung reizenden elektromagnetischen Gebietes (vgl. **63**) näher trat, wurde ihm das Bedürfnis einer greifbaren mechanischen Hülfsvorstellung mehr und mehr unabweisbar. Die erste Frage, welche hierbei Entscheidung verlangte, war die Auffassung der Bewegungsart für den Magnetismus einerseits, für die Elektrizität andererseits. Hierin standen sich bei den bisherigen Vorstellungen zweierlei Ansichten gegenüber: einerseits die zuerst von EULER ausgesprochene, namentlich mit Rücksicht auf unsere heutigen Kreislaufvorstellungen interessante Auffassung, dass der Magnetismus durch Ströme eines Fluidums bedingt ist, deren Richtung mit der der Kraftlinien zusammenfällt; diese von CHALLIS und weiterhin damals von HELMHOLTZ vertretene Annahme führt notwendig zur Auffassung der elektrischen Ströme als Drehbewegung um die Stromachse. Andererseits die von AMPÈRE und von WEBER vertretene Auffassung der magnetischen Kräfte als Drehungserscheinungen, welche zuerst von W. THOMSON 1847 zu seiner Theorie[1]) benutzt wurde, die unter Anlehnung an FARADAYS Untersuchungsergebnisse eine mechanische Darstellung der elektromagnetischen Kräfte geben will und manche Berührungspunkte mit der bedeutungsvoller gewordenen Theorie MAXWELLS aufweist. Diese letztere Auffassung machte MAXWELL zur seinigen, indem er die Theorie der Molekularwirbel entwickelte; den entscheidenden Beweggrund spricht er in folgenden Sätzen aus (vgl. a. a. O., 71):

Nun scheint es natürlich, zu vermuten, dass alle direkten Wirkungen einer beliebigen Ursache, welche selbst longitudinalen Charakters ist, auch wieder longitudinal sein müssen, die einer rotatorischen Ursache aber rotatorisch. Eine fortschreitende Bewegung längs einer Geraden kann niemals eine Drehung um diese Gerade als Achse erzeugen ohne irgend einen besonderen Mechanismus, wie den einer Schraube, welcher die Bewegung in einer bestimmten Richtung der Drehung in einem bestimmten Sinne (und die in der entgegengesetzten Richtung der Drehung im entgegengesetzten Sinne) zuordnet. Umgekehrt kann eine Drehung, obwohl sie eine Spannung längs der Drehungsachse erzeugt, für sich allein nicht bewirken, dass ein Strom längs der Drehungsachse eher in dem einen als in dem anderen Sinne fliesst.

Es ist bekannt, dass elektrische Ströme Fortbewegungen in der Stromrichtung bewirken. Sie übertragen elektrische Ladungen von einem Körper zum anderen und be-

---

1) Bezüglich der vorstehend erwähnten Theorien und Vorstellungen möge hier, namentlich mit Rücksicht auf die Vermeidung von Verwirrung, der kurze Hinweis genügen (siehe auch **42**).

wegen auch die Jonen der Elektrolyte in entgegengesetzten Richtungen, aber sie bewirken keine Drehung der Polarisationsebene des Lichtes, wenn dieses sich in der Richtung der Stromlinien fortpflanzt. Andererseits ist der magnetische Zustand durch keine im eigentlichen Sinne des Wortes longitudinale Erscheinung charakterisiert. Der Nord- und Südpol unterscheiden sich nur durch ihre Namen, welche ohne Veränderung des sonstigen Wortlautes der Gesetze sämtlicher magnetischer Erscheinungen vertauscht werden können. Der positive und negative Pol einer Batterie aber sind materiell unterscheidbar durch die verschiedenen chemischen Elemente des Wassers, welche sich an jedem derselben entwickeln. Hinwiederum ist der magnetische Zustand durch eine von Faraday entdeckte ausgesprochen rotatorische Erscheinung charakterisiert, nämlich die Drehung der Polarisationsebene von polarisiertem Lichte, welches sich längs der Kraftlinien fortpflanzt . . . .

Die Fortbewegung der Jonen durch den elektrischen Strom in bestimmt gegebenen Richtungen und die Drehung der Polarisationsebene des Lichtes durch die magnetische Kraft in einem bestimmt gegebenen Sinne sind die Thatsachen, deren Erwägung mich veranlasst hat, den Magnetismus als eine Drehungserscheinung, die elektrischen Ströme aber als Fortbewegungserscheinung aufzufassen.

Zunächst wendet er sich zur Darstellung der magnetischen Erscheinungen und sagt (vgl. a. a. O., 6 u. ff.):

Wir aber wollen nun die magnetische Kraft als eine Art Druck oder Zug oder noch allgemeiner als eine Spannung im Medium betrachten (welches letztere Wort wir im selben Sinne wie normale elastische Kraft gebrauchen).

Spannung ist die Wirkung und Gegenwirkung zwischen zwei unmittelbar benachbarten Teilen eines Körpers und besteht im allgemeinen aus Druck- oder Zugkräften, welche an derselben Stelle des Mediums in verschiedenen Richtungen verschieden sein können . . . . Wenn zwei Hauptspannungen gleich sind, so wird die dritte zu einer Symmetrieachse des grössten oder kleinsten Druckes, während die Spannungen in allen zur Achse senkrechten Richtungen untereinander gleich sind.

Wenn alle drei Hauptspannungen gleich sind, so ist der Druck in jeder Richtung gleich und es existieren keine bestimmten Hauptrichtungen der elastischen Kraft, wofür der gewöhnliche hydrostatische Druck ein Beispiel ist.

Der allgemeinste Typus der elastischen Kräfte ist zur Darstellung der magnetischen Kräfte nicht geeignet, weil eine magnetische Kraftlinie zwar Richtung und Intensität, aber keine dritte Eigenschaft hat, welche die verschiedenen zu ihr senkrechten Richtungen so unterscheiden würde, wie z. B. beim polarisierten Lichtstrahl die verschiedenen zu diesem senkrechten Richtungen voneinander charakteristisch verschieden sind . . . .

Wir wollen nun voraussetzen, dass die magnetischen Erscheinungen durch das Vorhandensein einer Zugkraft in der Richtung der Kraftlinien in Verbindung mit einem (nach allen Richtungen gleichen) hydrostatischen Drucke bedingt sind, oder mit anderen Worten, durch einen Druck, welcher in der äquatorialen Richtung grösser als in der achsialen ist. Die nächste Frage ist dann, welche mechanische Erklärung wir für diese Druckungleichheit in einem flüssigen oder doch allseitig beweglichen Medium geben können. Die Erklärung, welche sich uns zunächst bietet, ist die, dass der Überschuss des Druckes in äquatorialer Richtung von der Zentrifugalkraft von Wirbeln oder Strudeln im Medium herrührt, deren Achsen durchaus die Richtung der Kraftlinien haben.

Diese Erklärung der Ursache der Druckungleichheit bietet zugleich ein Mittel, um den dipolaren Charakter der Kraftlinien wiederzugeben. Jeder Wirbel ist wesentlich dipolar, da die beiden Enden seiner Achse durch den Sinn unterschieden sind, in welchem für ein von dem betreffenden Ende herblickendes Auge die Umdrehung zu geschehen scheint.

Um diese Theorie der Molekularwirbel auf elektrische Ströme anwenden zu können, sind weitere Annahmen bezw. Vorstellungen erforderlich, welche die Hauptschwierigkeiten boten, und deren Überwindung durch folgende Sätze Maxwells charakterisiert wird:

(S. 24.) Die Frage, ob es einen durch die Kraftlinien bestimmten Spannungszustand im Medium giebt, welcher von den beobachteten resultierenden Kräften eine befriedigende mechanische Erklärung zu geben vermag, muss daher bejaht werden. Die Antwort ist,

dass die Kraftlinien die Richtung des kleinsten Druckes in jedem Punkte des Mediums angeben.

Es ist nun die nächste Frage, was die mechanische Ursache dieser Druckunterschiede nach verschiedenen Richtungen sei. Wir haben im ersten Teile dieser Abhandlung vorausgesetzt, dass die Druckdifferenz durch Molekularwirbel erzeugt wird, deren Achsen parallel den Kraftlinien sind.

Wir bestimmten den Umdrehungssinn der Wirbel völlig willkürlich so, dass diese für ein Auge, welches nach der Richtung blickt, nach welcher ein Nordpol gezogen wird, im Sinne des Uhrzeigers rotieren.

Wir fanden, dass die Geschwindigkeit am Umfange jedes Wirbels proportional der Stärke der magnetischen Kraft und die Dichte der wirbelnden Substanz proportional der magnetischen induktiven Kapazität des Mediums sein muss.

Wir haben bisher keine Antwort auf die Frage gegeben, wie diese Wirbel in Rotation versetzt wurden und warum sie nach den bekannten, durch die Kraftlinien bestimmten Gesetzen in der Umgebung von Magneten und elektrischen Strömen verteilt sind. Letztere Fragen sind sicher von einer höheren Ordnung der Schwierigkeit als irgend eine der ersteren, und man thut wohl, wenn man die Vorstellungen, welche ich als vorläufige Antwort auf die letzteren Fragen hier vorschlage, von der mechanischen Annahme (elastischer Spannung im Medium), durch welche ich die erste Frage löste, und von der Hypothese der Molekularwirbel, welche eine plausible Antwort auf die zweite Frage (nach der mechanischen Erklärung der Spannungen) gab, trennt.

Wir müssen uns in der That jetzt auf eine Untersuchung über den physikalischen Zusammenhang dieser Wirbel mit den elektrischen Strömen einlassen, während wir noch über die Natur der Elektrizität vollkommen im Unklaren sind, ob sie eine Substanz oder zwei Substanzen oder gar keine Substanz ist, und in welcher Weise sie sich von der Materie unterscheidet und wie sie damit verknüpft ist.

Wir wissen, dass die Kraftlinien durch elektrische Ströme beeinflusst werden, und wir kennen die Verteilung der Kraftlinien um einen elektrischen Strom, so dass wir aus den magnetischen Kräften den Strom (dessen Dichte und Richtung in jedem Punkte) bestimmen können. Warum zeigt nun unter der Voraussetzung der Richtigkeit unserer Erklärung der Kraftlinien durch Molekularwirbel eine bestimmte Verteilung der magnetischen Kräfte immer einen elektrischen Strom an? Eine befriedigende Antwort auf diese Frage würde ein bedeutender Schritt zur Beantwortung der anderen wichtigen Frage sein, was ein elektrischer Strom ist.

Ich habe eine grosse Schwierigkeit in der Vorstellung der Existenz von Wirbeln in einem Medium gefunden, welche sich unmittelbar nebeneinander um parallele Achsen in derselben Richtung drehen. Die aneinander grenzenden Partien zweier benachbarter Wirbel müssen sich in entgegengesetzter Richtung bewegen, und es ist schwer zu verstehen, wie die Bewegung eines Teiles des Mediums mit einer gerade entgegengesetzten Bewegung des unmittelbar daran stossenden Teiles zusammen bestehen und letztere sogar hervorrufen kann.

Die einzige Annahme, welche mir über die Schwierigkeiten der Vorstellung einer Bewegung von dieser Art hinweghalf, ist die, dass die Wirbel durch eine Lage von Teilchen getrennt sind, welche sich alle in der entgegengesetzten Richtung wie die Wirbel um ihre Achse drehen, so dass die sich berührenden Oberflächen der Teilchen und der Wirbel dieselbe Bewegungsrichtung haben. Wenn man wünscht, dass sich in einem Mechanismus zwei Räder in derselben Richtung drehen, so fügt man ein Rad dazwischen so ein, dass es in beide eingreift, und nennt dieses Rad ein Zwischenrad. (Rollen, welche in gleicher Weise wirken, aber nur Reibungskontakt haben, heissen Friktionsrollen.) Auch bezüglich unseres Mediums mache ich die Annahme, dass sich eine Lage von Teilchen zwischen je zwei Wirbeln befindet, welche wie Friktionsrollen wirken, so dass jeder Wirbel (die seiner Oberfläche anliegenden Friktionsrollen zur Drehung in entgegengesetztem Sinne und dadurch) die umgebenden Wirbel zur Drehung in dem Sinne, in dem er sich selbst dreht, anregt . . . .

(S. 28.) Es ist daher offenbar, dass nach unserer Hypothese ein elektrischer Strom durch eine fortschreitende Bewegung der Friktionsteilchen dargestellt wird, welche zwischen je zwei benachbarten Wirbeln liegen. Wir wollen uns vorstellen, dass diese Friktionsteilchen sehr klein im Vergleich zu den Dimensionen eines Wirbels sind, dass die Masse[1]) aller zwischen zwei Wirbeln liegenden Friktionsteilchen im Vergleich zu der

1) Der Trägheitswiderstand im Sinne der Mechanik.

eines Wirbels verschwindet, und dass eine sehr grosse Anzahl von Wirbeln samt den sie umgebenden Friktionsteilchen in einem einzigen vollständigen Moleküle enthalten sind. Es muss vorausgesetzt werden, dass die Friktionsteilchen ohne Gleitung und ohne sich untereinander zu berühren zwischen den beiderseits anliegenden Wirbeln rollen und dass kein Energieverlust durch irgend welche Widerstandskräfte eintritt, solange sie in demselben Moleküle bleiben. Wenn aber ein stetiges Fortschreiten der Friktionsteilchen in einer bestimmten Richtung stattfindet, so müssen diese von einem Moleküle zum anderen übergehen; hierbei erfahren sie einen Widerstand, so dass elektrische Energie verloren geht und Wärme erzeugt wird.

(S. 29.) In Fig. 5 stelle der vertikale Kreis EE' einen elektrischen Strom dar, welcher vom Kupfer C zum Zink Z durch den Leiter EE' in der Richtung der kleinen Pfeile fliesst.

Der horizontale Kreis MM' stelle eine magnetische Kraftlinie dar, welche den elektrischen Strom umfasst. Die Nord- und Südrichtung derselben soll durch die kleinen Geraden SN und NS angezeigt werden.

Die kleinen vertikalen Kreise V und V' stellen die (Bahn eines Wirbelteilchens in den) Molekularwirbeln dar, deren Achse die magnetische Kraftlinie ist. V kreist im Sinne des Uhrzeigers, V' im entgegengesetzten (für den Beschauer der Zeichnung).

Es ist aus der Figur ersichtlich, dass, wenn V und V' aneinander grenzende Wirbel wären, die zwischen ihnen liegenden Teilchen sich nach abwärts bewegen würden, und dass umgekehrt die Friktionsteilchen, wenn sie aus irgend einer Ursache abwärts getrieben würden, Wirbel hervorrufen würden, welche so rotieren wie die in der Figur gezeichneten. Von unserem gegenwärtigen Gesichtspunkte aus erscheint also die Beziehung eines elektrischen Stromes zu seinen Kraftlinien analog der eines Zahnrades oder einer Zahnstange zu den Rädern, in welche sie eingreift.

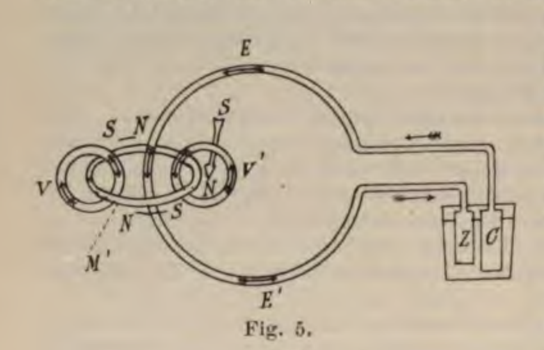


Fig. 5.

Über das Verhältnis der materiellen magnetischen Wirbel und der elektrischen Friktionsteilchen bemerkt er an anderer Stelle:

(S. 49.) Die Wirbel sind voneinander durch einfache Lagen runder Teilchen (der Friktionsteilchen) getrennt, so dass ein System von Zellen entsteht, deren Wände durch die Lagen dieser Friktionsteilchen gebildet werden, während die Substanz innerhalb jeder Zelle wie ein Wirbel zu rotieren vermag.

Die Friktionsteilchen jeder Lage rollen an den beiderseits anliegenden Wirbeln ohne Reibung und ohne zu gleiten. Sie können zwischen den Wirbeln vollkommen frei rollen und dabei in beliebiger Richtung fortschreiten, vorausgesetzt, dass sie dabei das Innere eines vollständigen Moleküls der Substanz nicht verlassen. Wenn sie aber von einem Molekül zu einem anderen übergehen, so erfahren sie einen Widerstand und erzeugen unregelmässige Bewegungen, welche sich als Wärme kundgeben. Diese Friktionsteilchen spielen in unserer Theorie die Rolle der Elektrizität. Ihr Fortschreiten in einer Richtung bedingt einen elektrischen Strom, ihre Drehungen dienen, um die Bewegungen der Wirbel von Stelle zu Stelle im Felde fortzupflanzen. Die hierbei entstehenden tangentialen Druckkräfte sind die elektromotorischen Kräfte.

Die Vorstellung von Teilchen, deren Bewegung durch die Bedingung bestimmt ist, dass sie an den beiderseits anliegenden Wirbeln ohne Gleitung rollen, mag einigermassen unbefriedigend scheinen. Ich will sie nicht als die richtige Ansicht über das, was in der Natur existiert, oder als eine Hypothese über das Wesen der Elektrizität im bisherigen Sinne dieses Wortes angesehen wissen. Diese Art der Verbindung ist jedoch mechanisch denkbar, leicht zu untersuchen und geeignet, die wirklichen mechanischen Beziehungen zwischen den bekannten elektromagnetischen Erscheinungen darzustellen. Ich stehe daher nicht an zu glauben, dass jeder, der den provisorischen Charakter dieser Hypothese richtig aufgefasst hat, durch dieselbe bei Untersuchungen über die wahre Deutung der Phänomene mehr gefördert als gehemmt werden wird.

Die Form der Zellen hat seiner Vorstellung naturgemäss grössere Schwierigkeiten bereitet, was aus den verschiedenen wechselnden Annahmen hervorgeht. Stellt man sich zum Zweck der leichteren Übersehbarkeit der Wechselwirkung zwischen Wirbel- und Friktionsteilchen dieselben zunächst mit quadratischem Querschnitt vor, so würde etwa Fig. 6 vier solche aneinanderstossende Wirbel (a) mit den zwischen gelagerten Friktionsteilchen (b) darstellen.



Fig. 6.

Dem wesentlichen Unterschiede zwischen Leitern und Isolatoren der Elektrizität wird Maxwell durch folgende Vorstellung gerecht:

(S. 55.) Körper, welche dem elektrischen Strome den Durchgang durch ihr Inneres nicht gestatten, nennt man Isolatoren, aber obwohl die Elektrizität nicht durch sie hindurchfliesst, so werden doch elektrische Wirkungen durch sie hindurch fortgepflanzt, und zwar in verschiedenem Grade je nach der Natur der Körper, so dass gleich gute Isolatoren als Dielektrika verschiedene Wirkungen ausüben können.

Wir haben also hier zwei von einander unabhängige Eigenschaften der Körper. Die eine, vermöge deren sie den Durchgang der Elektrizität durch ihr Inneres gestatten, und die andere, vermöge deren eine elektrische Wirkung durch sie hindurch fortgepflanzt wird, ohne dass irgend ein elektrischer Strom durch ihr Inneres hindurchgeht. Ein Leiter kann mit einer porösen Membran verglichen werden, welche dem Durchgange der Elektrizität mehr oder weniger Widerstand entgegensetzt, während ein Dielektrikum einer elastischen Membran gleicht, welche für die Flüssigkeit vollkommen undurchdringlich sein kann und doch deren Druck von der einen Seite zur anderen überträgt.

Solange eine elektromotorische Kraft auf einen Leiter wirkt, erzeugt dieselbe einen elektrischen Strom, welcher, da er Widerstand findet, eine fortwährende Verwandlung elektrischer Energie in Wärme veranlasst, die nicht wieder durch eine irgendwie beschaffene Umkehrung des Prozesses in die Form von elektrischer Energie rückverwandelt werden kann.

Wenn eine elektromotorische Kraft auf ein Dielektrikum wirkt, so erzeugt sie in den Volumelementen desselben einen Polarisationszustand, dessen Gesetze analog denen der Polarisation der Volumelemente des Eisens unter dem Einflusse magnetischer Kräfte sind und der ähnlich der magnetischen Polarisation als ein Zustand beschrieben werden kann, bei welchem jedes Teilchen an seinen entgegengesetzten Enden entgegengesetzte Pole besitzt.

Wir können uns denken, dass in einem Dielektrikum unter Wirkung der Induktion (Influenz) in jedem Moleküle die Elektrizität so verschoben wird, dass eine Seite desselben positiv, die andere negativ elektrisch wird, ohne dass aber die in einem Moleküle einmal vorhandene Elektrizität dieses Molekül verlässt und so von Molekül zu Molekül fortwandert.

Das Resultat dieser Wirkung auf die elektrischen Körper als Ganzes ist eine allgemeine Verschiebung der darin enthaltenen Elektrizität in einer bestimmten Richtung. Diese Verschiebung ist selbst kein (dauernder) elektrischer Strom, da sie, sobald sie einen bestimmten Wert erreicht hat, konstant bleibt, aber sie ist der Beginn eines Stromes und ihre Veränderungen stellen einen Strom in der positiven oder negativen Richtung dar, je nachdem die Verschiebung wächst oder abnimmt. Der Betrag der Verschiebung hängt von der Natur des Körpers und von der Stärke der elektromotorischen Kraft ab.

Indem er schliesslich noch aus der Gleichheit der von Fizeau experimentell bestimmten Lichtgeschwindigkeit und des Verhältnisses zwischen dem elektrostatischen und elektrodynamischen Masse der Elektrizitäten den Schluss zieht, „dass die Elektrizität des den Magnetismus vermittelnden Mediums in Luft gleich der des Lichtäthers ist, wenn diese zwei überall existierenden, einander durchdringenden und mit gleicher Elastizität begabten Medien nicht vielmehr ein und dasselbe Medium sind“ (S. 57), spricht er die charakteristische Grundlage seiner elektromagnetischen Lichttheorie aus, welche durch

die Versuche von Hertz hinsichtlich der wesentlichsten Punkte die experimentelle Bestätigung erfuhr.

65. Elektromechanik nach Maxwell.

Die Vorstellung der Verzahnung oder überhaupt der zwangläufigen Verkettung zwischen Leiterstrom, als den unter Druck fortwandernden Friktionsteilchen, und seinem Feld, als den in Richtung und Wirbelgeschwindigkeit veränderlichen Molekularwirbeln der Umgebung, gestattet nun alle Seiten der mannigfaltigen elektromagnetischen Erscheinungsgruppe an diesem mechanischen Modell gleichsam abzuleiten und im Bedarfsfalle schnell gegenwärtig zu haben. Unter der Voraussetzung, dass die wichtigsten mechanischen Erfahrungsthatsachen einem geistigen Individuum bekannt und bis zu einem gewissen Grade geläufig sind, wird jene mechanische Hülfsvorstellung für ihn einen erheblichen gedankenökonomischen Wert besitzen können, insofern das gedankliche Ableiten des zu erwartenden elektromagnetischen Geschehens auf Grund von Analogieschlüssen aus dem bekannten mechanischen Geschehen erfolgt und sich zum grössten Teil in einer bereits ausgearbeiteten Gedankenbahn bewegt. Hierdurch wird vielfach die geistige Reibungsarbeit erheblich herabgesetzt werden können, und der geistige Zwischenschluss innerhalb der Gültigkeitsgrenzen der Analogie in gewissem Sinne automatisch erfolgen, was die nutzbringende Verwendung der ersparten Arbeit bezw. Aufmerksamkeit nach anderer Richtung ermöglicht.

Unter Benutzung dieser von Maxwell angenommenen Grundelemente: der materiellen Molekularwirbel für die magnetische Seite, der (elektrischen) Friktionsteilchen für die elektrische Seite, sowie der wesentlichen Wechselbeziehungen (vgl. **64**) zwischen beiden zur Darstellung des untrennbaren Zusammenhanges beider Erscheinungsgebiete, sowie weiterhin ihrer Verknüpfung mit der Optik, lassen sich die für die Elektrotechnik wichtigsten Erscheinungsseiten etwa wie folgt darstellen, wenn man der besseren Übersicht halber die mehr elektrische Erscheinungsseite, natürlich mit dem untrennbaren Feld beim elektrischen Ausgleich, voranstellt, hingegen die mehr magnetische Seite, soweit speziellere magnetische Erscheinungen in Frage kommen, hieran anschliessend behandelt (siehe H. I, 2).

Wird auf die Friktionsteilchen b (vgl. Fig. 6) an irgend einer Stelle ein Druck in bestimmter Richtung ausgeübt, d. h. werden sie elektromotorisch angetrieben — über die verschiedenen elektromotorischen Ursachen vgl. **66** — so pflanzt sich dieser Druck, wenn man sich die Friktionsteilchen inkompressibel vorstellt (eine ganz wesentliche Annahme), nach Art eines hydrostatischen Druckes nach allen Seiten fort. Ist der Leiterkreis geschlossen, so können die Teilchen b dem Druck dauernd nachgeben und ins Strömen geraten. Vor weiterer Betrachtung dieses Falles mögen aber die rein elektrischen Erscheinungen, wie sie die Elektrostatik darbietet, etwas näher betrachtet werden. Es sei demnach angenommen, dass der Leiterkreis (vgl. Fig. 7 und 5) zu beiden Seiten der Stelle mit dem elektromotorischen Antrieb (E) nicht geschlossen sei, sondern dass eine isolierende Zwischenschicht, etwa wie bei einem Kondensator, C, die beiden Leiterenden trenne. Alsdann wird der Druck sich wie vorher bis an die Leiterenden hydrostatisch fortpflanzen, sodass auf beiden Seiten der Dielektrikumsschicht, von C, die Druckdifferenz E auftritt. Nach der obenerwähnten Annahme Maxwells können die Friktionsteilchen (b) der Isolationsschicht zwar nicht fortwandern, doch sind sie elastisch verschiebbar, also gleichsam wie zwischen Kautschukmembranen eingeschlossen. In der Dielektrikumsschicht werden also diese

Kautschukwände k (vgl. Fig. 8), welche die Friktionsteilchen b zwischen zwei Molekularwirbeln a_1 und a_2 in ihrer Ruhelage zu halten suchen, ohne Druckdifferenz auf beiden Seiten keine Ausbiegung zeigen. Bei Auftreten der beiderseitigen Druckdifferenz E werden sie, bezw. das Dielektrikum, innerhalb des elektrostatischen Feldes einen Zwangszustand annehmen, insofern sie in Richtung des Druckes E (vgl. Fig. 9) durchgebogen werden, womit eine zweiseitige elektrische Verschiebung, eben eine „dielektrische Verschiebung" verbunden ist, derart, dass, solange die Druckdifferenz E bestehen bleibt, auf der „positiv geladenen" Seite eine Anzahl frei beweglicher Friktionsteilchen (b) der leitenden, positiven Belegung in das Dielektrikum gleichsam eindringt, d. h. zwischen die Wirbel a (vgl. das mit b bezeichnete Friktionsteilchen auf der linken Seite der Fig. 9), während

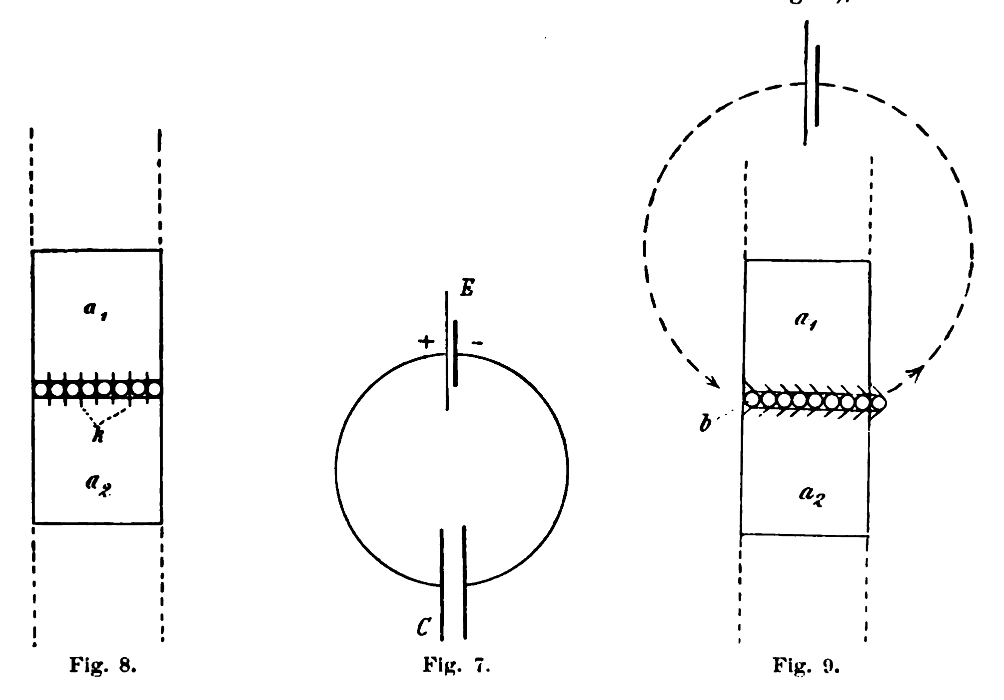


Fig. 8. Fig. 7. Fig. 9.

auf der „negativ geladenen" Seite eine gleichgrosse Anzahl unfrei beweglicher, d. h. nur elastisch verschiebbarer Friktionsteilchen in die wiederum leitende negative Belegung der rechten Seite übertritt. Bei Aufhören des Druckes E, das ist Entladung der elektrostatisch geladenen Belegungen von C wird die dielektrische Verschiebung unter Entspannen der elastischen Wände (Kautschukmembranen) wieder rückgängig gemacht. Wird der Druck E so gross, dass die Festigkeit der Wände k — d. h. die Summe der an irgend einer Stelle der Dielektrikumsschicht in Serie geschalteten Membranen, welche mit der Dicke der Isolationsschicht proportional wächst — überschritten wird, so erfolgt an dieser Stelle ein Durchbrechen bezw. „Durchschlagen" der Isolation und ein Ausgleich der gedrückten Friktionsteilchen b (Elektrizität) in dem nunmehr geschlossenen Leiterkreis. Die Festigkeits- und Elastizitätseigenschaften der Membranen k sind bei den verschiedenen Isolatoren (Dielektricis) von verschiedener Grösse, so dass jene Eigenschaften eine Analogie zu den spezifischen Dielektrikumseigenschaften bilden, indem

z. B. das Verhältnis der Dehnbarkeit jeder Membran *k* (vgl. Fig. 8) bei irgend einem Isoliermaterial (Dielektrikum) zu der Dehnbarkeit einer jeden bei Luft (als dielektrischem Normalmaterial) die Zahl darstellen würde, welche als Dielektrizitätskonstante ($\varkappa$) bezeichnet wird, u. s. f. Handelt es sich (wie in Fig. 9 angenommen), um eine Isolationsschicht mit parallelen leitenden Begrenzungsflächen (Belegungen), so werden die Verschiebungsbahnen der Friktionsteilchen *b* (elektrostatische „Kraftlinien", richtiger jedoch Induktionslinien) auch parallel verlaufen, und die Verschiebung an allen Stellen des Querschnittes gleich gross sein, d. h. man hat es mit einem „homogenen elektrischen Feld" zu thun. (Weiteres siehe **112** u. ff.)

Es ist jedoch unschwer einzusehen, wie bei ungleicher Dicke der dielektrischen Zwischenschicht und bei wechselndem Dielektrikum die Verschiebung erfolgen wird: In den einzelnen Verschiebungsbahnen zwischen den beiden Belegungen (*A* und *B* der Fig. 10) wird eine Grösse der Verschiebung eintreten

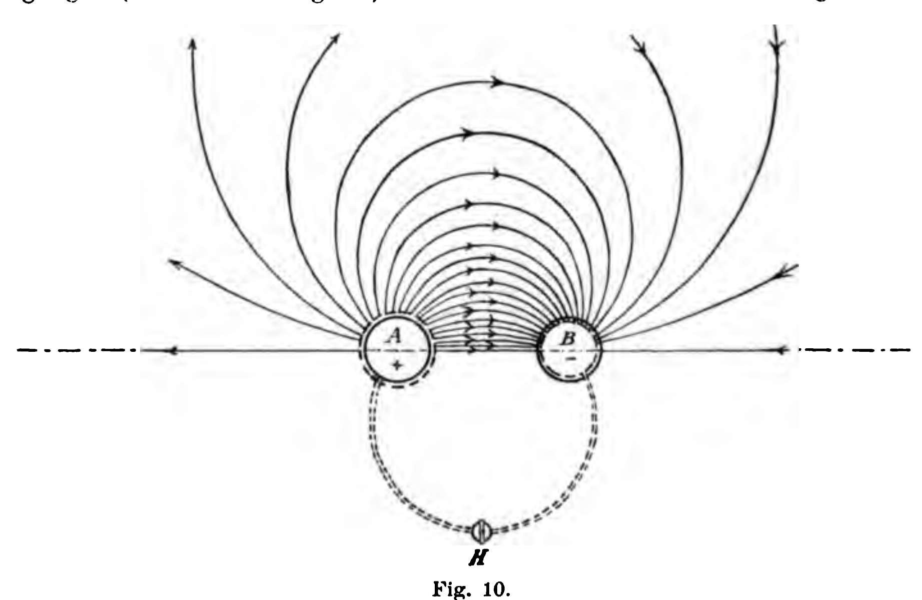


Fig. 10.

umgekehrt proportional mit dem dielektrischen Widerstand jener verbindenden Kanäle mit teilweise gekrümmtem Verlauf und dementsprechend die Dichte der das elektrische Feld geometrisch abbildenden Induktionslinien ausfallen. Diese Vorstellung gestattet sonach jede beliebige Erscheinung der Elektrostatik anschaulich zu machen, wobei noch insofern eine Vereinfachung eintreten kann, als man wegen des Zurücktretens der magnetischen Felderscheinungen sein Augenmerk nur auf die inkompressiblen Friktionsteilchen (*b*) zu richten hat, die sich nach Analogie des diese Fluidumseigenschaft sehr angenähert besitzenden Wassers verhalten. So werden z. B. zwei vorher elektrisch neutrale Körper *A* und *B*, welche entweder durch Reiben selbst entgegengesetzt elektrisch werden, oder auch durch „leitende" Berührung mit elektrischen Körpern eine gleiche und entgegengesetzte Ladung erhalten, sich in folgender Weise mechanisch analogisieren lassen: Bei den beiden Kugeln *A* und *B* (vgl. Fig. 10) stelle die ausgezogene Linie die unveränderliche materielle Grenzfläche der Körper dar, welche bei dem elektrisch normal gespannten, d. h. neutralen, Zustande mit der Grenzfläche zwischen den frei

beweglichen Friktionsteilchen b der leitend gedachten Voll- oder Hohlkörper A und B und den elastisch begrenzten Friktionsteilchen b' des trennenden Dielektrikums, z. B. Luft, zusammenfallen. Da, wie erwähnt, die materiellen Wirbelmoleküle keine weitere Aktion haben als die neutrale Grenzfläche zu markieren, so können wir uns die leitenden Teile von A und B durch einen Hohlraum, in dem sich Wasser frei bewegen kann, darstellen, während das übrige eine elastische, z. B. gallertartige Begrenzung (gedanklich auch am besten wieder durch eine beliebig dicke Kautschukhülle ersetzt), bilden möge. Denken wir uns A und B direkt oder auch mittels einer (Hohl-) Leitung verbunden und üben bei geöffnetem Hahn H auf B einen Druck E aus, so wird Wasser (Elektrizität) von B nach A hinübergepresst werden, bis der Gegendruck der elastischen Wände (des in Zwangszustand versetzten dielektrischen Zwischenmediums) dem Drucke E das Gleichgewicht hält. Die in der Fig. 10 sehr augenfällig gewählte Verkleinerung der elastischen Grenzfläche bei B und der gleichstarken (Volum-) Vergrösserung bei A wird die negative bezw. positive elektrische Ladung darstellen (vgl. hierzu auch Fig. 9). Für die Schnittebene durch die Mitte von A und B giebt der obere Teil von Fig. 10 den ungefähren Verlauf der elektrischen Druck- bezw. Kraftlinien an, welche in einiger Entfernung von der Mittellinie sich in ihrem Verlauf den magnetischen Kraftlinien zwischen einem zusammengehörigen Nord- und Südpol annähern. Unterhalb der (strichpunktierten) Symmetrieachse sind die Kraftlinien fortgelassen. Bei Aufhören des Druckes unter Bestehenbleiben der leitenden Verbindung wird die Differenz der frei beweglichen Fluidumsteilchen (Wasser) zwischen A und B wieder beseitigt durch Entladung der überschüssigen Menge von B nach A unter Entspannung des elastischen Mittels. Bei Aufrechterhaltung des Druckes bis zur Aufhebung der leitenden Verbindung (mechanisch durch Absperren, elektrisch durch Isolierung, z. B. durch Entfernung der beiden elektrischen Körper A und B, deren gegenseitige Elektrisierung durch Reibung einem vorübergehenden, einseitig gerichteten Druck auf die Fluidumsteilchen entsprechen würde), wird der gespannte Zustand erhalten und die Druckdifferenzierung wird je nach der Undurchlässigkeit des Trennungsmittels (Güte der Isolatoren) entsprechend lange bestehen bleiben, wenn sich nicht leitende, mit A und B zusammenhängende Kanäle (Leitungsstrecken) so weit nähern, dass die zwischen beiden Seiten vorhandene Druckdifferenz die Trennungswand (Isolationsschicht) zu durchbrechen und die Entladung in aperiodischer oder in schwingender (oscillatorischer) Form herbeizuführen vermag, wobei der Charakter der letzteren in beiden Fällen nur von den Widerstands- und Trägheitsverhältnissen abhängig ist. (Weiteres siehe H. I, 2 in **193** u. ff.)

In letzterem Falle ist jedoch zu beachten, dass, so weitgehend auch die Analogie auf den ersten Blick zu sein scheint, doch die zulässige Grenze der Wasseranalogie schon in einem Punkte überschritten ist. Während nämlich bei dem Eintreten einer oscillatorischen Wasserentladung die für den Schwingungsvorgang erforderliche Trägheit T, neben der in Richtung der normalen Ruhelage treibenden Kraft D, dem bewegten Mittel (Wasser innerhalb der Rohrleitung) selbst anhaftet, besitzt die bewegte oder strömende Elektrizität erfahrungsgemäss keine nachweisbare Trägheit; die letztere haftet vielmehr dem ausserhalb der Leitung befindlichen und mit den strömenden Friktionsteilchen verketteten magnetischen Feld (magnetische Molekularwirbel)

an, und bedingt eben jene wichtige von MAXWELL eingeführte Ergänzung der Fluidumsvorstellung.

Vor Eingehen auf diese Ergänzung, welche bei allen elektrischen Strömungsvorgängen von der höchsten Wichtigkeit ist, sei hinsichtlich der rein elektrischen, d. h. der elektrostatischen Verhältnisse noch erwähnt, dass in dem obigen Beispiel die beiden Körper A und B die beiden „Belegungen" einer Kondensatorvorrichtung darstellen, deren korrespondierende Punkte aber jetzt nicht mehr, wie bei der Anordnung in Fig. 9, durch geradlinige Verschiebungsbahnen (Induktionslinien oder auch elektrostatische Kraftlinien) im Dielektrikum miteinander verbunden sind, sondern grösstenteils durch krummlinige, ähnlich der Eisenfeilanordnung zwischen zwei ungleichnamigen magnetischen Polen (A und B). Ein wenn auch weniger deutliches Sichtbarmachen dieser elektrostatischen Induktionslinien ist infolge der Verschiedenheit der dielektrischen Verschiebbarkeit (Dielektrizitätskonstante $\varkappa$) durch Korkfeilicht im elektrischen Felde möglich. Auch bezüglich der räumlichen Veränderung, der sogenannten „Dichte der Kraftlinien", d. h. hier der Verschiebungsgrösse der elastisch beweglichen Friktionsteilchen in den einzelnen von A nach B gehenden Verschiebungsbahnen im Dielektrikum, liegen die Verhältnisse ähnlich wie bei den bekannteren magnetischen Verhältnissen.

Bemerkt sei noch, dass die in der oberen Hälfte von Fig. 10 vorgenommene Konstruktion der dielektrischen Verschiebungsbahnen auch gleichzeitig Verlauf und Gestalt derselben in dem praktisch wichtigeren Fall darstellt, dass A und B die Querschnitte von Parallelleitungen darstellen, welche unter Spannung stehen (vgl. **68**).

Die Menge der beim Eintreten der Verschiebung durch jeden vollen Querschnitt des elektrostatischen Kreislaufes hindurchtretenden Friktionsteilchen stellt die negative oder positive Ladung von A bezw. B dar, und liefert die greifbare Analogie des Begriffes der Elektrizitätsmenge. Diese auf die Einheit der wirkenden Druckdifferenz (E) bezogene Ladung liefert ein Mass für die elektrostatische Kapazität (C) des Systems. Der reciproke Wert $\frac{1}{C}$ dieses Kapazitätsbegriffes liefert den dielektrischen (Spann-) Widerstand (S_d) des elektrostatischen Kreislaufes, oder nach Abtrennung von der Ladespannung E, den des trennenden dielektrischen Mediums zwischen A und B; derselbe lässt sich auch durch die Dimensionen und die Dielektrizitätskonstante (spezifische dielektrische Elastizität der Membrane k vgl. oben) ausdrücken. Auf die Gesamtverschiebung bezogen und unter Berücksichtigung, dass die Druckdifferenz E nach Art des hydrostatischen Druckes zwischen irgend je zwei korrespondierenden Punkten der leitenden Oberflächen stets in gleicher Stärke vorhanden ist und bei der Verschiebung in Wirksamkeit tritt, ergiebt sich, wie unschwer zu übersehen, zunächst für jede herausgeschnittene differentielle Verbindungsröhre zwischen A und B der Verschiebungswiderstand direkt proportional mit der Länge (l) derselben, das ist mit der Anzahl der in Serie geschalteten Membrane k, auf welche sich E bei konstant bleibendem q gleichmässig verteilen muss; ferner umgekehrt proportional mit dem Querschnitt q jener in Richtung der Induktionslinien verlaufenden Verbindungsröhre, und endlich umgekehrt proportional der Durchbiegungsfähigkeit oder Dehnbarkeit von k, das ist der Dielektrizitätskonstante $\varkappa$ des zunächst homogen gedachten Mediums. Hat die Verbindungsröhre verschiedene Dielektrika zu

durchsetzen, oder ändert sich der Querschnitt in den einzelnen aufeinanderfolgenden Röhrenabschnitten, so werden die einzelnen Teilwiderstände

$$\frac{l'}{q' \cdot \varkappa'} + \frac{l''}{q'' \cdot \varkappa''} + \frac{l'''}{q''' \cdot \varkappa'''}$$

summiert. Der dielektrische Widerstandsbegriff ist also völlig analog dem sogenannten OHMschen Widerstand formuliert. Die Verschiebungs-kapazität jener differentiellen Verbindungsröhre ist mithin der reziproke Wert $\frac{q \cdot \varkappa}{l}$, und die Gesamtkapazität C, kurzweg als Kapazität jener Kondensatorvorrichtung bezeichnet, wäre:

$$C = \Sigma \frac{q \cdot \varkappa}{l},$$

wenn die Summe von allen parallel geschalteten Verbindungsröhren zwischen A und B genommen wird, während der gesamte dielektrische Spannwiderstand S_d sich zu

$$S_d = \frac{1}{C} = \frac{1}{\Sigma \frac{q \cdot \varkappa}{l}}$$

ergiebt (siehe jedoch **68** wegen des Masssystemfaktors 4π).

Hat man es scheinbar mit einem einzelnen isolierten und elektrisch geladenen Körper, z. B. der Kugel A, zu thun, so wird die andere leitende Belegung, welche die isolierende Dielektrikumsschicht auf der anderen Seite begrenzt, und damit die Längen l aller einzelnen elektrostatischen Verbindungsröhren bedingt, stets durch die nächste leitende Umgebung, z. B. die Zimmerwände oder sonstige mit der Erde in leitender Verbindung befindliche Körper, gebildet, da eine einseitige Elektrisierung nach den Untersuchungen von FARADAY ein Ding der Unmöglichkeit ist, und jeder elektrischen Ladung stets in der näheren oder weiteren Umgebung eine gleich grosse aber entgegengesetzte Ladung entsprechen muss, zu welcher durch die trennende dielektrische Zwischenschicht hindurch die elektr(ostat)ischen Drucklinien (Induktionslinien, oder nach obiger Vorstellung Verschiebungsbahnen) führen, welche korrespondierende Punkte verbinden, und als den ganzen Zwischenraum erfüllend zu denken sind. Ein in ein solches elektrisches Feld hineingebrachter leitender Körper, muss nach obiger Betrachtung einerseits durch Ausschaltung des dielektrischen Widerstandes des von ihm nunmehr eingenommenen Raumes die Kapazität des Systems vergrössern, er muss weiterhin auch eine Verschiebung der Friktionsteilchen auf seiner Oberfläche erfahren, d. h. die Influenzerscheinungen aufweisen: die (mit Rücksicht auf die dielektrische Verschiebung gesprochen) einerseits auf ihm mündenden, andererseits wieder von ihm ausgehenden elektr(ostat)ischen Induktionsröhren (Verschiebungsbahnen) werden seine Oberfläche in zwei Gebiete teilen; bei dem einen werden die mündenden Drucklinien eine Verschiebung der elastisch beweglichen Friktionsteilchen des angrenzenden Dielektrikums in seine leitende Oberfläche hinein (negative Ladung) hervorrufen, auf dem anderen die wieder austretenden Drucklinien die Verschiebung einer gleich grossen Anzahl der frei beweglichen Friktionsteilchen der leitenden Oberfläche in das angrenzende Dielektrikum hinein (positive Ladung, vgl. hierzu Fig. 11 sowie auch Fig. 56). Alle „Influenz"-Erscheinungen ohne Ausnahme lassen mit Hülfe dieser Vor-

... und einheitliche Auffassung zu, welche besser und ... die ältere dualistische Fluidumsvorstellung (vgl. 58) die ver... Erscheinungen zu „erklären", d. h. in der Vorstellung ... umfassendere Thatsachen zurückzuführen vermag.

Die verschiedenen aus der Erfahrung bekannten Ursachen der elektrischen Spannungserregung würden nach MAXWELLS Vorstellung alle darin ... und durch diese Vorstellung gleichsam unter den einheitlichen ... gebracht werden, dass sie einen mechanischen Druck in bestimmter Richtung auf die Friktionsteilchen ausüben. Alle Arten von ... Elektrizitätsquellen oder besser Spannungserregern — denn nach ... Vorstellung kann nicht die Elektrizität selbst, d. h. die überall und in unveränderlicher Anzahl vorhandenen Friktionsteilchen geschaffen werden, sondern nur ihr Zwangs- oder Spannungszustand durch Umsetzung ... einer anderen Energieform in elektrische — würden also in letzter ... in der Ausübung eines gerichteten mechanischen Druckes auf die Friktionsteilchen an gewissen Übergangsstellen bestehen. Unterschiede würden in folgenden Punkten bestehen, und eine hiernach gewählte Einteilung der Spannungserreger zulassen:

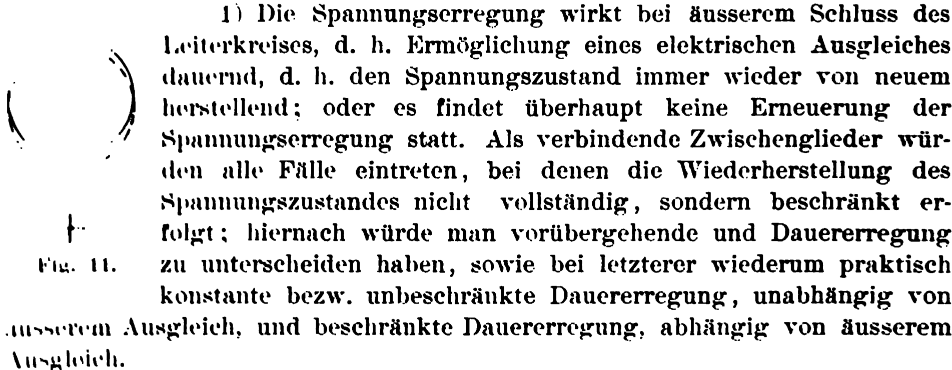


Fig. 11.

1) Die Spannungserregung wirkt bei äusserem Schluss des Leiterkreises, d. h. Ermöglichung eines elektrischen Ausgleiches dauernd, d. h. den Spannungszustand immer wieder von neuem herstellend; oder es findet überhaupt keine Erneuerung der Spannungserregung statt. Als verbindende Zwischenglieder würden alle Fälle eintreten, bei denen die Wiederherstellung des Spannungszustandes nicht vollständig, sondern beschränkt erfolgt; hiernach würde man vorübergehende und Dauererregung zu unterscheiden haben, sowie bei letzterer wiederum praktisch konstante bezw. unbeschränkte Dauererregung, unabhängig von äusserem Ausgleich, und beschränkte Dauererregung, abhängig von äusserem Ausgleich.

2) Der Druck auf die Friktionsteilchen oder die Spannung wirkt dauernd nach derselben Richtung ohne periodische Schwankung in der Grösse, oder es liegen solche periodische Schwankungen vor: im letzteren Falle wäre weiterhin zu unterscheiden, ob diese periodischen Schwankungen unter Richtungswechsel in einem zum Nullwert symmetrischen, mehr oder weniger einfachen zeitlichen Verlauf der Spannungskurve bestehen, oder, sei es mit, sei es ohne Richtungswechsel, unsymmetrisch zum Nullniveau verlaufen. Hiernach würde man Erreger von Gleichspannung, Wechselspannung und Wellenspannung zu unterscheiden haben.

3) Unterscheidung nach der Beschaffenheit der Trennungsfläche, welche die Spannungserregung bezw. die Umsetzung einer anderen Energieform in elektrische vermittelt; hiernach wird man einteilen in:

a) Spannungserreger mit dielektrischem Zwischenträger der elektrischen Energie; hierbei erfolgt direkte Umsetzung der mechanischen Energie in elektrische Spannungsenergie unter Erhaltung der „Elektrizitätsmenge" und Versetzung immer neuer Dielektrikumsschichten in den elektrisch gespannten (Spannungs)zustand (vgl. 112 u. ff.). Eine solche Spannungserregung liegt vor beim Kondensator, d. h. dem ursprünglich mit diesem Namen belegten Apparate mit entfernbaren Belegungen, oder noch vollkommener bei der Influenzmaschine (vgl. 138).

beweglichen Friktionsteilchen b der leitend gedachten Voll- oder Hohlkörper A und B und den elastisch begrenzten Friktionsteilchen b' des trennenden Dielektrikums, z. B. Luft, zusammenfallen. Da, wie erwähnt, die materiellen Wirbelmoleküle keine weitere Aktion haben als die neutrale Grenzfläche zu markieren, so können wir uns die leitenden Teile von A und B durch einen Hohlraum, in dem sich Wasser frei bewegen kann, darstellen, während das übrige eine elastische, z. B. gallertartige Begrenzung (gedanklich auch am besten wieder durch eine beliebig dicke Kautschukhülle ersetzt), bilden möge. Denken wir uns A und B direkt oder auch mittels einer (Hohl-) Leitung verbunden und üben bei geöffnetem Hahn H auf B einen Druck E aus, so wird Wasser (Elektrizität) von B nach A hinübergepresst werden, bis der Gegendruck der elastischen Wände (des in Zwangszustand versetzten dielektrischen Zwischenmediums) dem Drucke E das Gleichgewicht hält. Die in der Fig. 10 sehr augenfällig gewählte Verkleinerung der elastischen Grenzfläche bei B und der gleichstarken (Volum-) Vergrösserung bei A wird die negative bezw. positive elektrische Ladung darstellen (vgl. hierzu auch Fig. 9). Für die Schnittebene durch die Mitte von A und B giebt der obere Teil von Fig. 10 den ungefähren Verlauf der elektrischen Druck- bezw. Kraftlinien an, welche in einiger Entfernung von der Mittellinie sich in ihrem Verlauf den magnetischen Kraftlinien zwischen einem zusammengehörigen Nord- und Südpol annähern. Unterhalb der (strichpunktierten) Symmetrieachse sind die Kraftlinien fortgelassen. Bei Aufhören des Druckes unter Bestehenbleiben der leitenden Verbindung wird die Differenz der frei beweglichen Fluidumsteilchen (Wasser) zwischen A und B wieder beseitigt durch Entladung der überschüssigen Menge von B nach A unter Entspannung des elastischen Mittels. Bei Aufrechterhaltung des Druckes bis zur Aufhebung der leitenden Verbindung (mechanisch durch Absperren, elektrisch durch Isolierung, z. B. durch Entfernung der beiden elektrischen Körper A und B, deren gegenseitige Elektrisierung durch Reibung einem vorübergehenden, einseitig gerichteten Druck auf die Fluidumsteilchen entsprechen würde), wird der gespannte Zustand erhalten und die Druckdifferenzierung wird je nach der Undurchlässigkeit des Trennungsmittels (Güte der Isolatoren) entsprechend lange bestehen bleiben, wenn sich nicht leitende, mit A und B zusammenhängende Kanäle (Leitungsstrecken) so weit nähern, dass die zwischen beiden Seiten vorhandene Druckdifferenz die Trennungswand (Isolationsschicht) zu durchbrechen und die Entladung in aperiodischer oder in schwingender (oscillatorischer) Form herbeizuführen vermag, wobei der Charakter der letzteren in beiden Fällen nur von den Widerstands- und Trägheitsverhältnissen abhängig ist. (Weiteres siehe H. I, 2 in **193** u. ff.)

In letzterem Falle ist jedoch zu beachten, dass, so weitgehend auch die Analogie auf den ersten Blick zu sein scheint, doch die zulässige Grenze der Wasseranalogie schon in einem Punkte überschritten ist. Während nämlich bei dem Eintreten einer oscillatorischen Wasserentladung die für den Schwingungsvorgang erforderliche Trägheit T, neben der in Richtung der normalen Ruhelage treibenden Kraft D, dem bewegten Mittel (Wasser innerhalb der Rohrleitung) selbst anhaftet, besitzt die bewegte oder strömende Elektrizität erfahrungsgemäss keine nachweisbare Trägheit; die letztere haftet vielmehr dem ausserhalb der Leitung befindlichen und mit den strömenden Friktionsteilchen verketteten magnetischen Feld (magnetische Molekularwirbel)

an, und bedingt eben jene wichtige von MAXWELL eingeführte Ergänzung der Fluidumsvorstellung.

Vor Eingehen auf diese Ergänzung, welche bei allen elektrischen Strömungsvorgängen von der höchsten Wichtigkeit ist, sei hinsichtlich der rein elektrischen, d. h. der elektrostatischen Verhältnisse noch erwähnt, dass in dem obigen Beispiel die beiden Körper A und B die beiden „Belegungen" einer Kondensatorvorrichtung darstellen, deren korrespondierende Punkte aber jetzt nicht mehr, wie bei der Anordnung in Fig. 9, durch geradlinige Verschiebungsbahnen (Induktionslinien oder auch elektrostatische Kraftlinien) im Dielektrikum miteinander verbunden sind, sondern grösstenteils durch krummlinige, ähnlich der Eisenfeilanordnung zwischen zwei ungleichnamigen magnetischen Polen (A und B). Ein wenn auch weniger deutliches Sichtbarmachen dieser elektrostatischen Induktionslinien ist infolge der Verschiedenheit der dielektrischen Verschiebbarkeit (Dielektrizitätskonstante $\varkappa$) durch Korkfeilicht im elektrischen Felde möglich. Auch bezüglich der räumlichen Veränderung, der sogenannten „Dichte der Kraftlinien", d. h. hier der Verschiebungsgrösse der elastisch beweglichen Friktionsteilchen in den einzelnen von A nach B gehenden Verschiebungsbahnen im Dielektrikum, liegen die Verhältnisse ähnlich wie bei den bekannteren magnetischen Verhältnissen.

Bemerkt sei noch, dass die in der oberen Hälfte von Fig. 10 vorgenommene Konstruktion der dielektrischen Verschiebungsbahnen auch gleichzeitig Verlauf und Gestalt derselben in dem praktisch wichtigeren Fall darstellt, dass A und B die Querschnitte von Parallelleitungen darstellen, welche unter Spannung stehen (vgl. **68**).

Die Menge der beim Eintreten der Verschiebung durch jeden vollen Querschnitt des elektrostatischen Kreislaufes hindurchtretenden Friktionsteilchen stellt die negative oder positive Ladung von A bezw. B dar, und liefert die greifbare Analogie des Begriffes der Elektrizitätsmenge. Diese auf die Einheit der wirkenden Druckdifferenz (E) bezogene Ladung liefert ein Mass für die elektrostatische Kapazität (C) des Systems. Der reciproke Wert $\frac{1}{C}$ dieses Kapazitätsbegriffes liefert den dielektrischen (Spann-) Widerstand (S_d) des elektrostatischen Kreislaufes, oder nach Abtrennung von der Ladespannung E, den des trennenden dielektrischen Mediums zwischen A und B; derselbe lässt sich auch durch die Dimensionen und die Dielektrizitätskonstante (spezifische dielektrische Elastizität der Membrane k vgl. oben) ausdrücken. Auf die Gesamtverschiebung bezogen und unter Berücksichtigung, dass die Druckdifferenz E nach Art des hydrostatischen Druckes zwischen irgend je zwei korrespondierenden Punkten der leitenden Oberflächen stets in gleicher Stärke vorhanden ist und bei der Verschiebung in Wirksamkeit tritt, ergiebt sich, wie unschwer zu übersehen, zunächst für jede herausgeschnittene differentielle Verbindungsröhre zwischen A und B der Verschiebungswiderstand direkt proportional mit der Länge (l) derselben, das ist mit der Anzahl der in Serie geschalteten Membrane k, auf welche sich E bei konstant bleibendem q gleichmässig verteilen muss; ferner umgekehrt proportional mit dem Querschnitt q jener in Richtung der Induktionslinien verlaufenden Verbindungsröhre, und endlich umgekehrt proportional der Durchbiegungsfähigkeit oder Dehnbarkeit von k, das ist der Dielektrizitätskonstante $\varkappa$ des zunächst homogen gedachten Mediums. Hat die Verbindungsröhre verschiedene Dielektrika zu

durchsetzen, oder ändert sich der Querschnitt in den einzelnen aufeinanderfolgenden Röhrenabschnitten, so werden die einzelnen Teilwiderstände

$$\frac{l'}{q' \cdot \varkappa'} + \frac{l''}{q'' \cdot \varkappa''} + \frac{l'''}{q''' \cdot \varkappa'''}$$

summiert. Der dielektrische Widerstandsbegriff ist also völlig analog dem sogenannten OHMschen Widerstand formuliert. Die Verschiebungskapazität jener differentiellen Verbindungsröhre ist mithin der reziproke Wert $\frac{q \cdot \varkappa}{l}$, und die Gesamtkapazität C, kurzweg als Kapazität jener Kondensatorvorrichtung bezeichnet, wäre:

$$C = \Sigma \frac{q \cdot \varkappa}{l},$$

wenn die Summe von allen parallel geschalteten Verbindungsröhren zwischen A und B genommen wird, während der gesamte dielektrische Spannwiderstand S_d sich zu

$$S_d = \frac{1}{C} = \frac{1}{\Sigma \frac{q \cdot \varkappa}{l}}$$

ergiebt (siehe jedoch **68** wegen des Masssystemfaktors 4π).

Hat man es scheinbar mit einem einzelnen isolierten und elektrisch geladenen Körper, z. B. der Kugel A, zu thun, so wird die andere leitende Belegung, welche die isolierende Dielektrikumsschicht auf der anderen Seite begrenzt, und damit die Längen l aller einzelnen elektrostatischen Verbindungsröhren bedingt, stets durch die nächste leitende Umgebung, z. B. die Zimmerwände oder sonstige mit der Erde in leitender Verbindung befindliche Körper, gebildet, da eine einseitige Elektrisierung nach den Untersuchungen von FARADAY ein Ding der Unmöglichkeit ist, und jeder elektrischen Ladung stets in der näheren oder weiteren Umgebung eine gleich grosse aber entgegengesetzte Ladung entsprechen muss, zu welcher durch die trennende dielektrische Zwischenschicht hindurch die elektr(ostat)ischen Drucklinien (Induktionslinien, oder nach obiger Vorstellung Verschiebungsbahnen) führen, welche korrespondierende Punkte verbinden, und als den ganzen Zwischenraum erfüllend zu denken sind. Ein in ein solches elektrisches Feld hineingebrachter leitender Körper, muss nach obiger Betrachtung einerseits durch Ausschaltung des dielektrischen Widerstandes des von ihm nunmehr eingenommenen Raumes die Kapazität des Systems vergrössern, er muss weiterhin auch eine Verschiebung der Friktionsteilchen auf seiner Oberfläche erfahren, d. h. die Influenzerscheinungen aufweisen: die (mit Rücksicht auf die dielektrische Verschiebung gesprochen) einerseits auf ihm mündenden, andererseits wieder von ihm ausgehenden elektr(ostat)ischen Induktionsröhren (Verschiebungsbahnen) werden seine Oberfläche in zwei Gebiete teilen; bei dem einen werden die mündenden Drucklinien eine Verschiebung der elastisch beweglichen Friktionsteilchen des angrenzenden Dielektrikums in seine leitende Oberfläche hinein (negative Ladung) hervorrufen, auf dem anderen die wieder austretenden Drucklinien die Verschiebung einer gleich grossen Anzahl der frei beweglichen Friktionsteilchen der leitenden Oberfläche in das angrenzende Dielektrikum hinein (positive Ladung, vgl. hierzu Fig. 11 sowie auch Fig. 56). Alle „Influenz“-Erscheinungen ohne Ausnahme lassen mit Hülfe dieser Vor-

stellung eine greifbare und einheitliche Auffassung zu, welche besser und natürlicher als die ältere dualistische Fluidumsvorstellung (vgl. **58**) die verschiedenen speziellen Erscheinungen zu „erklären", d. h. in der Vorstellung auf einfachere und umfassendere Thatsachen zurückzuführen vermag.

66. Spannungscharakter und Art der Erregung.

Die verschiedenen aus der Erfahrung bekannten Ursachen der elektrischen Spannungserregung würden nach MAXWELLS Vorstellung alle darin übereinstimmen, und durch diese Vorstellung gleichsam unter den einheitlichen Gesichtspunkt gebracht werden, dass sie einen mechanischen Druck in bestimmter Richtung auf die Friktionsteilchen ausüben. Alle Arten von sogenannten Elektrizitätsquellen oder besser Spannungserregern — denn nach jener Vorstellung kann nicht die Elektrizität selbst, d. h. die überall und in stets unveränderlicher Anzahl vorhandenen Friktionsteilchen geschaffen werden, sondern nur ihr Zwangs- oder Spannungszustand durch Umsetzung irgend einer anderen Energieform in elektrische — würden also in letzter Linie in der Ausübung eines gerichteten mechanischen Druckes auf die Friktionsteilchen an gewissen Übergangsstellen bestehen. Unterschiede würden in folgenden Punkten bestehen, und eine hiernach gewählte Einteilung der Spannungserreger zulassen:



Fig. 11.

1) Die Spannungserregung wirkt bei äusserem Schluss des Leiterkreises, d. h. Ermöglichung eines elektrischen Ausgleiches dauernd, d. h. den Spannungszustand immer wieder von neuem herstellend; oder es findet überhaupt keine Erneuerung der Spannungserregung statt. Als verbindende Zwischenglieder würden alle Fälle eintreten, bei denen die Wiederherstellung des Spannungszustandes nicht vollständig, sondern beschränkt erfolgt; hiernach würde man vorübergehende und Dauererregung zu unterscheiden haben, sowie bei letzterer wiederum praktisch konstante bezw. unbeschränkte Dauererregung, unabhängig von äusserem Ausgleich, und beschränkte Dauererregung, abhängig von äusserem Ausgleich.

2) Der Druck auf die Friktionsteilchen oder die Spannung wirkt dauernd nach derselben Richtung ohne periodische Schwankung in der Grösse, oder es liegen solche periodische Schwankungen vor; im letzteren Falle wäre weiterhin zu unterscheiden, ob diese periodischen Schwankungen unter Richtungswechsel in einem zum Nullwert symmetrischen, mehr oder weniger einfachen zeitlichen Verlauf der Spannungskurve bestehen, oder, sei es mit, sei es ohne Richtungswechsel, unsymmetrisch zum Nullniveau verlaufen. Hiernach würde man Erreger von Gleichspannung, Wechselspannung und Wellenspannung zu unterscheiden haben.

3) Unterscheidung nach der Beschaffenheit der Trennungsfläche, welche die Spannungserregung bezw. die Umsetzung einer anderen Energieform in elektrische vermittelt; hiernach wird man einteilen in:

a) Spannungserreger mit dielektrischem Zwischenträger der elektrischen Energie; hierbei erfolgt direkte Umsetzung der mechanischen Energie in elektrische Spannungsenergie unter Erhaltung der „Elektrizitätsmenge" und Versetzung immer neuer Dielektrikumsschichten in den elektrisch gespannten Zwangszustand (vgl. **112** u. ff). Eine solche Spannungserregung liegt vor beim Kondensator, d. h. dem ursprünglich mit diesem Namen belegten Apparate mit entfernbaren Belegungen, oder noch vollkommener bei der Influenzmaschine (vgl. **138**).

erscheint weiterhin eine natürliche Annahme, dass der spezifische Reibungskoeffizient zwischen Friktionsteilchen und den Übergangsstellen der materiellen Moleküle von der Beschaffenheit der letzteren, bezw. dem Leitungsmaterial abhängt, und somit der spezifische Leitungswiderstand durch jenen Reibungskoeffizienten seine Darstellung erfährt, ebenso wie die Abhängigkeit des ersteren von der Leitertemperatur durch eine entsprechende Abhängigkeit des letzteren.

Eine scheinbare Schwierigkeit bietet der Umstand, dass die in Wärme umgesetzte Leistung im Leiterstück vom OHMschen Widerstand R bei der in ihm fliessenden Stromstärke J erfahrungsmässig durch $J^2 \cdot R$ beziehungsweise $\frac{E^2}{R}$ gegeben ist, doch löst sich dieselbe bei Berücksichtigung der eigenartigen und praktisch so bedeutungsvollen Zusammensetzung der einzelnen Faktoren zu dem Begriff des OHMschen- oder Ausgleichwiderstandes, eine Zusammensetzung, welche wie oben beim dielektrischen Widerstand mit Rücksicht auf den Gesamtausgleich (Stromstärke) erfolgt ist, und nicht mit Rücksicht auf die Stromdichte, bezw. die gesamte Reibungsgrösse im Leiter. Die gesamte Reibungsgrösse (R') wäre proportional mit der Anzahl der molekularen Übergangsstellen in jedem Friktionskanal, das ist mit der Länge l des Leiters; ferner proportional mit dem spezifischen Reibungskoeffizienten desselben, das ist dem spezifischen Widerstand ϱ des Materials; und endlich mit der Anzahl der parallelen Friktionskanäle, das ist dem Querschnitt q des Leiters, so dass man erhielte:

$$R' = l \cdot \varrho \cdot q,$$

während der OHMsche Widerstand R bekanntlich zu

$$R = \frac{l \cdot \varrho}{q}$$

gebildet ist.

Diese eigentümliche, bei allen Kreislaufwiderständen in gleicher Weise sich wiederholende Bildung (vgl. die Formulierung des dielektrischen Widerstandes, sowie des magnetischen Widerstandes) tritt überall dort auf, wo ein spezifischer oder Einheitsflächendruck nach Art des Dampfdruckes oder hydraulischen Druckes (Atmosphären, kg auf cm², Volt, Windungsampere) mit dem Gesamtausgleich (Stromstärke, Gesamtfeld u. s. w.) in Beziehung gesetzt wird, wie es im OHMschen Gesetz für stationäre Gleichstromverhältnisse, ferner beim dielektrischen und magnetischen Ausgleichgesetz geschehen ist. Setzt man dagegen den Totaldruck $E' = E \cdot q$, d. h. Einheitsdruck E mal Druckfläche q in Beziehung mit dem spezifischen Ausgleich (Stromdichte J_1 bezw. Geschwindigkeit der Friktionsteilchen), so folgt als dritte bedingende Grösse die oben unter R' angegebene Widerstandformulierung, wie sich sofort ergiebt, wenn man in dem OHMschen Gesetz $E = J \cdot R$ für E und J die Werte $\frac{E'}{q}$ bezw. $J_1 \cdot q$ einsetzt, wodurch man die Gleichung erhält:

$$\frac{E'}{J_1} = q^2 \cdot R = R'.$$

Diese Betrachtung enthält daher nicht nur die Lösung der oben erwähnten scheinbaren Schwierigkeit, sondern dürfte auch zum besseren Verständnis der Ausgleichbegriffe und speziell des OHMschen Widerstandbegriffes dienen, der ursprünglich rein empirisch als drittes Bedingungsglied zu den bereits

vermeidliche Folgeerscheinung jeder elektrischen Spannungserregung bilden. Dennoch erscheint es praktisch besser, diese Übergangserscheinung zu dem Gebiet der elektrischen Stromerscheinungen gesondert zu betrachten, und die gedankliche Scheidung der Spannungserregung von den Strömungserscheinungen aufrecht zu erhalten.

Hiernach wären zunächst die Verhältnisse bei der stationären elektrischen Strömung als die grundlegenden Erscheinungskomponenten zu betrachten. Wird die Spannungserregung in gleicher Stärke aufrecht erhalten (konstanter Druck auf die Friktionsteilchen in bestimmter Richtung), und ist dieselbe innerhalb eines geschlossenen Leiterkreises von konstantgehaltenen Dimensionen wirksam, so geschieht nach MAXWELLS mechanischen Analogievorstellungen folgendes: Die im Leiter frei beweglichen Friktionsteilchen können bei in sich geschlossenem Leiterkreis dem auf sie an einer oder mehreren Stellen ausgeübten und von dort hydrostatisch sofort durch den ganzen Kreis fortgepflanzten Druck nachgeben und zu strömen anfangen; hierbei sind sie jedoch gezwungen, von Molekül zu Molekül überzugehen, wobei sie einen Widerstand nach Art einer Reibung erfahren, welche einen Gegendruck ausübt, und bei stationär gewordenem Strömungszustand der Friktionsteilchen den primären oder aktiven Druck der EMK kompensiert. Bei den mit dem Strömen verknüpften Teilerscheinungen wird man zu besserer Übersicht vorläufig eine Trennung in die Vorgänge innerhalb und ausserhalb des Leiterkreises vornehmen. Innerhalb des Leiterkreises würden die Strömungserscheinungen folgende Bedeutung haben müssen: Nach den vorausgegangenen Festsetzungen übernehmen die Friktionsteilchen die Rolle der Elektrizitätsmenge; somit wird eine bestimmte Elektrizitätsmenge durch eine bestimmte Anzahl Friktionsteilchen dargestellt, ferner die durch einen Leiterquerschnitt in der Zeiteinheit tretende Elektrizitätsmenge, das ist der Begriff der Stromstärke, durch die in jener Zeiteinheit durch einen beliebigen aber vollen Querschnitt des Leiterkreises hindurchwandernde bezw. -strömende Anzahl Friktionsteilchen J. Hierbei ist zu beachten, dass dies ganz allgemein gilt, d. h. unabhängig von der Stromart, ob Gleich- ob Wechselstrom, also unabhängig von der Richtung des Hindurchtretens, und von dem Umstande, ob die durch den Querschnitt strömenden Friktionsteilchen stets andere sind, wie beim Gleichstrom, oder stets dieselben hin- und herwandernden, wie beim Wechselstrom. Bei gleicher Wandergeschwindigkeit der Friktionsteilchen in allen Unterteilen desselben Querschnittes q wird die Stromstärke auf die Querschnittseinheit J_1 (Begriff der Stromdichte) durch die Geschwindigkeit der Friktionsteilchen dargestellt sein.

68. Formulierung des Ausgleichwiderstandes.

Der Reibungswiderstand, welchen die Friktionsteilchen beim Übergang von Molekül zu Molekül erfahren, lässt sich in seiner Abhängigkeit von der Geschwindigkeit J_1 von vornherein nicht angeben, da mechanisch der Reibungswiderstand in der verschiedensten Weise von der Bewegungsgeschwindigkeit abhängt, und ziemlich alle Werte von nahezu vorhandener Unabhängigkeit bei gut geschmierter gleitender Bewegung fester Körper aufeinander bis zu quadratisch mit der Geschwindigkeit wachsendem Luftwiderstand bei schnell bewegten Flächen vorkommen. Erfahrungsgemäss wächst nach den Untersuchungen OHMS der Widerstand aller elektrischen Leiter gegen strömende Elektrizität bei konstanter Temperatur direkt proportional mit der Stromstärke bezw. Stromdichte, so dass dieser innerhalb der obigen Grenzen fallende Wert der Vorstellung keine weiteren Schwierigkeiten bietet. Es

erscheint weiterhin eine natürliche Annahme, dass der spezifische Reibungskoeffizient zwischen Friktionsteilchen und den Übergangsstellen der materiellen Moleküle von der Beschaffenheit der letzteren, bezw. dem Leitungsmaterial abhängt, und somit der spezifische Leitungswiderstand durch jenen Reibungskoeffizienten seine Darstellung erfährt, ebenso wie die Abhängigkeit des ersteren von der Leitertemperatur durch eine entsprechende Abhängigkeit des letzteren.

Eine scheinbare Schwierigkeit bietet der Umstand, dass die in Wärme umgesetzte Leistung im Leiterstück vom OHMschen Widerstand R bei der in ihm fliessenden Stromstärke J erfahrungsmässig durch $J^2 \cdot R$ beziehungsweise $\frac{E^2}{R}$ gegeben ist, doch löst sich dieselbe bei Berücksichtigung der eigenartigen und praktisch so bedeutungsvollen Zusammensetzung der einzelnen Faktoren zu dem Begriff des OHMschen- oder Ausgleichwiderstandes, eine Zusammensetzung, welche wie oben beim dielektrischen Widerstand mit Rücksicht auf den Gesamtausgleich (Stromstärke) erfolgt ist, und nicht mit Rücksicht auf die Stromdichte, bezw. die gesamte Reibungsgrösse im Leiter. Die gesamte Reibungsgrösse (R') wäre proportional mit der Anzahl der molekularen Übergangsstellen in jedem Friktionskanal, das ist mit der Länge l des Leiters; ferner proportional mit dem spezifischen Reibungskoeffizienten desselben, das ist dem spezifischen Widerstand ϱ des Materials; und endlich mit der Anzahl der parallelen Friktionskanäle, das ist dem Querschnitt q des Leiters, so dass man erhielte:

$$R' = l \cdot \varrho \cdot q,$$

während der OHMsche Widerstand R bekanntlich zu

$$R = \frac{l \cdot \varrho}{q}$$

gebildet ist.

Diese eigentümliche, bei allen Kreislaufwiderständen in gleicher Weise sich wiederholende Bildung (vgl. die Formulierung des dielektrischen Widerstandes, sowie des magnetischen Widerstandes) tritt überall dort auf, wo ein spezifischer oder Einheitsflächendruck nach Art des Dampfdruckes oder hydraulischen Druckes (Atmosphären, kg auf cm^2, Volt, Windungsampere) mit dem Gesamtausgleich (Stromstärke, Gesamtfeld u. s. w.) in Beziehung gesetzt wird, wie es im OHMschen Gesetz für stationäre Gleichstromverhältnisse, ferner beim dielektrischen und magnetischen Ausgleichgesetz geschehen ist. Setzt man dagegen den Totaldruck $E' = E \cdot q$, d. h. Einheitsdruck E mal Druckfläche q in Beziehung mit dem spezifischen Ausgleich (Stromdichte J_1 bezw. Geschwindigkeit der Friktionsteilchen), so folgt als dritte bedingende Grösse die oben unter R' angegebene Widerstandformulierung, wie sich sofort ergiebt, wenn man in dem OHMschen Gesetz $E = J \cdot R$ für E und J die Werte $\frac{E'}{q}$ bezw. $J_1 \cdot q$ einsetzt, wodurch man die Gleichung erhält:

$$\frac{E'}{J_1} = q^2 \cdot R = R'.$$

Diese Betrachtung enthält daher nicht nur die Lösung der oben erwähnten scheinbaren Schwierigkeit, sondern dürfte auch zum besseren Verständnis der Ausgleichbegriffe und speziell des OHMschen Widerstandbegriffes dienen, der ursprünglich rein empirisch als drittes Bedingungsglied zu den bereits

vorher herausgebildeten Begriffen der elektrischen Spannung E und Stromstärke J gewählt wurde.

Die Analogie, welche hinsichtlich des Aufbaues aus den Grunddimensionen und einem Materialkoeffizienten zwischen allen Arten von Ausgleichwiderständen besteht, also hier bei dem elektrischen, dielektrischen und magnetischen Widerstand, lässt praktisch wertvolle Übertragungen aus dem einen in das andere Gebiet zu. Ist z. B. die Formel für die elektrostatische Kapazität eines Leitersystems bekannt, etwa für zwei parallele Cylinder (Drähte) von der relativ grossen Länge l_1 gegenüber ihrem Radius r auf ihrem Abstand d (vgl. **114** sowie auch Fig. 10) zu

$$C = \varkappa \cdot \frac{l_1}{4\, ln \frac{d}{r}} \text{ elektrostatische Einheiten,}$$

so folgt zunächst bei Zugrundelegung der COULOMBschen Versuche für die elektro s t a t i s c h e n Einheiten, wonach die Elektrizitätsmenge Q die Zahl von $4\pi Q$ elektrische Kraftlinien aussendet, d. h. ein elektrisches Feld (N_d) im Gesamtbetrage von $4\pi Q$ elektrischen Kraftlinien erzeugt,

$$\frac{E}{S_d} = N_d = 4\pi Q = 4\pi C \cdot E, \text{ also } S_d = \frac{1}{4\pi C} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{4\, ln \frac{d}{r}}{l_1 \cdot \varkappa}$$

und auf Grund der obigen Analogie der elektrische Ausgleichwiderstand R zwischen ihnen in Wasser oder einem anderen leitenden Medium von der elektrischen Leitfähigkeit k zu

$$R = \frac{ln \frac{d}{r}}{\pi \cdot l_1 \cdot k} = \frac{1}{\pi \cdot l_1} \cdot \varrho \cdot ln \frac{d}{r}.$$

Man hat also in allen Formeln für die elektrostatische Kapazität eines Leitersystems nur nötig die spezifische dielektrische Verschiebungfähigkeit $\varkappa$ (Dielektrizitätskonstante) des Mediums zu ersetzen, durch dessen spezifische elektrische Leitfähigkeit k multipliziert mit $4\,\pi$ um das e l e k t r i s c h e Ausgleichvermögen des Systems für stationären Strom zu erhalten, oder als dessen Reziproke den OHMschen Ausgleichwiderstand. Hierbei ist nur zu beachten, dass um R in Ω zu erhalten, wenn alle Werte in cm und k als k_{Hg}, d. h. bezogen auf Quecksilber eingesetzt werden (vgl. H. I, 2; z. B. von 20 % H_2SO_4 in aq bei 18° C wäre $k_{Hg} = 611.10^{-7}$), noch eine Umrechnung von $\frac{1}{k}$ auf OHM-Centimeter zu erfolgen hat durch Multiplikation von k mit $1{\cdot}063.10^4$, also im vorliegenden Fall $k' = 650.10^{-3}$ in die obige Formel für R einzusetzen wäre, oder $\varrho' = \frac{1}{k'} = 1{\cdot}538$.

Umgekehrt kann man aus dem in OHM-Centimeter gemessenen Widerstand irgend einer Elektrodenanordnung in einer Flüssigkeit von bekanntem k' bei Ersetzung von k' durch $\frac{\varkappa}{4\pi}$ die Kapazität derselben in elektrostatischen Einheiten ermitteln. Eine analoge Beziehung zwischen den Werten des elektrischen und magnetischen Widerstandes bezw. der Ausgleichfähigkeit ergiebt sich bei Ersetzung von k' oder $\frac{\varkappa}{4\pi}$ durch die magnetische Permeabilität μ des Zwischenmediums.

69. Mechanik des magnetischen Feldes.

Bei den Vorgängen innerhalb des Leiterkreises bietet die Vorstellung noch viele Berührungspunkte mit den älteren Fluidumstheorien; wesentlich neu ist aber die Untrennbarkeit jener von den Vorgängen, welche ausserhalb des Leiterkreises, im sogenannten Leiterfeld, stattfinden. Da die neuesten Forschungen immer mehr den Beweis geliefert haben, dass dieses Leiterfeld eigentlich die wesentlichste Seite der Ausgleicherscheinungen bildet, insofern im Feld der Sitz der Energie zu suchen ist, so stellt gerade diese Seite der MAXWELLschen Hülfsvorstellungen das charakteristisch Moderne dar. Das Eintreten des Strömens der im geschlossenen Leiterkreis gedrückten Friktionsteilchen zwischen den materiellen Wirbelmolekülen hindurch kann, wie soeben gezeigt, einerseits das Auftreten des Spannungsabfalles (Aufbrauchen der an dem Ort der EMK erzeugten Druckdifferenz) nach dem Gesetz von OHM, andererseits die in jedem Leiter nach dem Gesetz von JOULE auftretende Wärmeerscheinung zur Darstellung bringen. Die an der Leiteroberfläche, d. h. in der Grenzschicht zwischen Leiter und dem umgebenden isolierenden Medium in Strömung versetzten Friktionsteilchen werden aber auf Grund ihres zahnradartigen Eingreifens in die materiellen Wirbelmoleküle der nächsten Isolierschicht die Strömungswirkungen nicht auf den Leiter selbst beschränkt sein lassen. Stellt man sich die Wirbelachsen dieser angrenzenden Moleküle zunächst beliebig gerichtet vor, so dass bei einer hinreichend grossen Anzahl von Molekülen vor Eintreten der Strömung keine bestimmte Richtung bevorzugt ist, so wird durch die eintretende Strömung von der Leiteroberfläche zunächst auf die angrenzenden Moleküle der nächsten Isolierschicht ein R i c h t b e s t r e b e n ausgeübt werden. Denke man sich nun die Achsen der materiellen Wirbelmoleküle ihrerseits mit einem Richtbestreben versehen, so dass die Achsen durch ein äusseres Drehmoment zwar eine elastische Ablenkung aus ihrer ursprünglichen Stellung, welche je nach der Grösse des Drehmoments und ihrer Nachgiebigkeit bezw. Richtbarkeit verschieden gross ist, erfahren können, aber stets das Bestreben behalten, aus diesem Zwangszustand (Spannungszustand) wieder in ihre ursprüngliche Achsenlage zurückzukehren, so werden sich diese beiden Richtbestreben ins Gleichgewicht setzen. Die Folge wird aber sein, dass bei Zerlegung aller Wirbelachsenrichtungen in Komponenten und Summieren der letzteren nunmehr eine ausgezeichnete Achsenrichtung vorhanden sein wird, indem die algebraische Summe der Achsenkomponenten senkrecht zur Stromrichtung nunmehr einen Wert grösser als Null erhält. Denkt man sich diese gerichtete Komponente von der übrigen Summe an ungerichteten und sich gegenseitig bindenden, d. h. nach aussen unwirksam machenden Komponenten abgelöst, so wird diese abstrahierte Richtungsgrösse ein Mass für die Feldstärke abgeben. Stellt (in Fig. 12) SL ein beliebiges Stück des stromdurchflossenen Leiterkreises dar, so werden jene gerichteten Komponenten rings um den Leiter einen Wirbelring bezw. Wirbelfaden A bilden, dessen Wirbel alle mit der an SL grenzenden Seite im gleichen Sinne wie die in SL strömenden Friktionsteilchen rotieren. Der Verlauf jener g e r i c h t e t e n K o m p o n e n t e n wird hierbei eine Linie geben, welche mit der magnetischen „Kraftlinie" FARADAYS zusammenfällt. Mit dieser R i c h t u n g direkt verknüpft muss aber auch von seiten der zu strömen beginnenden Friktionsteilchen ein Antriebsbestreben auf die anstossenden Wirbel des Ringes AA

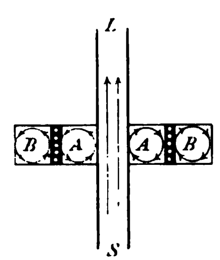


Fig. 12.

ausgeübt werden, welches eine Beschleunigung, d. h. eine Wirbelintensitätsvermehrung des Ringes *AA* zur Folge hat. Dieser Antrieb, bezw. diese Wirbelintensitätsvermehrung und damit auch die von den strömenden Friktionsteilchen auf Ring *AA* übertragene Energie wird mit jener Richtbarkeit Hand in Hand gehen, so zwar, dass die Geschwindigkeitsvermehrung direkt proportional mit der erzielten gerichteten Komponente zunehmen wird. Die in Form von kinetischer Feldenergie aufgespeicherte Energiemenge wird also quadratisch mit jener Komponente zunehmen.

Auf Grund der angenommenen Wechselwirkung zwischen Friktionsteilchen und Wirbelmolekülen kann aber dieser Richtungsantrieb nicht auf den unmittelbar anstossenden Wirbelring *AA* beschränkt bleiben. Die Beschleunigung der an den Leiter anstossenden Wirbelseiten des Ringes *AA* schliesst auch eine Beschleunigung der entgegengesetzt sich bewegenden und weiterhin der mit diesen zahnradartig verketteten Friktionsteilchen zwischen *A* und *B* ein. Gehören die letzteren einem Dielektrikum an, so können sie wegen ihrer elastischen, unfreien Bewegungsfähigkeit diesem Antrieb nur ganz beschränkt durch transversale Ausweichung (Elongation) nachgeben, und müssen deshalb den Antrieb, sowohl was Richtung als damit verbundene Beschleunigung anbelangt, an den anstossenden Wirbelring *BB* weitergeben, wobei nur eine entsprechende Abschwächung bei Verteilung auf eine grössere Zahl von Wirbeln durch die Energiegleichung bedingt wird. Dasselbe findet zwischen Wirbelring *BB* und seinem Nachbar *CC* u. s. w. statt. Soweit also die Friktionsteilchen der Umgebung (des Feldes) entweder zwischen nichtleitenden oder wenigstens keinen geschlossenen Leiterkreis bildenden materiellen Molekülen sich befinden, werden sie wie mit ihrer Achse festgehaltene Zahnrädchen wirken, d. h. ein Fortschreiten des von *SL* ausgehenden Antriebes bewirken, wodurch der Begriff der elektromagnetischen Welle, oder nach Eintritt eines stationären Strömungszustandes der Friktionsteilchen in *SL* (bei Gleichstrom) derjenige des magnetischen Feldes (elektrotonische Zustand) veranschaulicht ist.

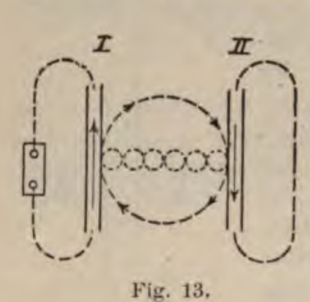


Fig. 13.

70. Mechanik der Wechsel- und Selbstinduktion.

Eine Reihe weiterer Folgerungen aus der mechanischen Analogie gestattet ohne weiteres die Erscheinungen der Wechsel- und Selbstinduktion mechanisch fassbar zur Darstellung zu bringen. Trifft dieser fortschreitende Antrieb nämlich auf Friktionsteilchen, die einem geschlossenen Leiterkreise angehören, also frei beweglich sind und dem Antrieb nachgeben können, so muss der elektromotorisch wirkende Antrieb, wie in Fig. 13 schematisch angedeutet, in diesem sekundären, mit *II* bezeichneten und teilweis parallel zu *I* verlaufenden Leiterkreis ein Strömen der Friktionsteilchen veranlassen, das entgegengesetzt demjenigen in *I* gerichtet ist und so lange anhält, wie die Antriebsvariation der angrenzenden Wirbel. Das bei der mechanischen Hülfsvorstellung herbeigeführte Wandern der Friktionsteilchen von *II* wird also in jeder Beziehung elektrisch dem Verhalten eines in *II* „induzierten" Stromes entsprechen. Dies gilt sowohl für die beiden Stromstösse, welche in *II* bei Einleiten und Aufhören eines zwischendurch stationären Gleichstromes in *I* auftreten, als auch für den dauernd in *II* induzierten (sekundären) Wechselstrom, wenn in *I* ein primärer Wechselstrom fliesst, so dass das Zwischenmedium von einem dauernden elektromagnetischen Wellenschlag

durchsetzt wird. Da auch die Rückwirkungserscheinungen von Stromkreis *II* auf das Feld und mittelst dieses auf Stromkreis *I* mechanisch (Doppelhebel) in ganz analoger Weise wie elektrisch eintreten, so ist der Begriff der Wechselinduktion durch die mechanische Hülfsvorstellung veranschaulicht.

Diese Rückwirkung auf die primäre Strömung in *I* muss in Übereinstimmung mit der mechanischen Hülfsvorstellung auch ohne das Vorhandensein von *II* eintreten. Der mit der Richtung verknüpfte Antrieb der Wirbel des magnetischen „Feldes", welches nach dem Vorangegangenen jeden durchströmten Leiter umgeben muss — wenn auch nach dieser Richtung sehr grosse Unterschiede der aufgespeicherten kinetischen Energiemengen, das ist gradueller Natur, auftreten können — wirkt auf materielle, d. h. mit Trägheit begabte Massenteilchen. Aus diesem Grunde verlangt eine vollkommenere Analogie auch Übereinstimmung und Deutung der dadurch bedingten mechanischen Bewegungserscheinungen. Diese dem Mechanismus innewohnende Trägheit zeigt nun mechanisch genau das analoge Verhalten wie in elektrischer Hinsicht das magnetische Feld, dessen elektromagnetische Trägheitswirkung unter dem Begriff Selbstinduktion bekannt ist. Besondere Beachtung verdient hierbei der Umstand, dass nicht die strömenden Friktionsteile, deren Masse oder wenigstens Bewegungsmoment, in Übereinstimmung mit den experimentellen Untersuchungen von Hertz, verschwindend klein angenommen werden muss gegenüber den entsprechenden Grössen des Feldes, sondern die ausserhalb des Leiters das magnetische Feld bildenden Wirbelmoleküle bezw. ihre gerichtete kinetische Wirbelenergie ein Mass für die Selbstinduktion eines Leiterkreises oder einer bestimmten Leiterstrecke abgeben. Diese Wechselwirkung, welche die Rückwirkung des Feldes auf den Leiter, qualitativ in Gestalt des Nachhinkens der Wirkung (Strom) hinter der Ursache (EMK), quantitativ in Gestalt der auftretenden Reaktionsdrucke (EMK der Selbstinduktion) bedingt, hat Maxwell für den Maschinentechniker sehr anschaulich wie folgt beschrieben (vgl. Maxwell, Physikal. Kraftlinien):

(S. 39.) Die elektromotorische Kraft entsteht durch die Wirkung zwischen den Wirbeln und den dazwischen liegenden Friktionsteilchen, wenn die Wirbelgeschwindigkeit in irgend einem Teile des Feldes verändert wird. Sie entspricht dem Drucke auf die Achse eines Rades in einer Maschine, wenn die Geschwindigkeit des dasselbe treibenden Rades erhöht oder vermindert wird.

Der elektrotonische Zustand ist die elektromotorische Kraft, welche erforderlich wäre, wenn die Ströme u. s. w., denen diese Kraftlinien entsprechen, plötzlich aus dem Ruhezustande des ganzen Feldes bis zu ihren wirklichen Werten ansteigen würden, welche sie bei den Versuchen immer erst allmählich erreichen. Er entspricht der Momentankraft, welche auf die Achse eines Rades in einer Maschine wirken würde, wenn die Maschine früher in Ruhe wäre und dem Treibrade plötzlich seine wirkliche Geschwindigkeit erteilt würde.

Wenn die Maschine durch plötzliche Hemmung der Bewegung des Treibrades momentan zur Ruhe gebracht würde, so würde jedes Rad einen Anstoss erfahren, welcher gleich, aber entgegengesetzt gerichtet ist dem, den es hätte erfahren müssen, wenn der Maschine plötzlich ihre Bewegung erteilt worden wäre.

Diese Momentankraft kann für jeden beliebigen Teil des Mechanismus berechnet werden, und mag das reduzierte Moment der Maschine für diesen Punkt heissen. Bei Veränderung der Bewegung der Maschine findet man die Kraft im gewöhnlichen Sinne des Wortes, welche auf irgend einen Teil in Folge dieser Veränderung der Bewegung wirkt, indem man das reduzierte Moment nach der Zeit differentiiert, gerade so, wie dem früher Gefundenen gemäss die elektromotorische Kraft aus dem elektrotonischen Zustande durch die gleiche Rechnungsoperation abgeleitet wird.

71. Vorstellungen von O. Lodge.

Diese Analogie des elektromagnetischen Geschehens mit demjenigen bei Rotationsmechanismen hat bei den auf MAXWELL weiterbauenden Nachfolgern eine ganz hervorragende Stelle in den mechanischen Hülfsvorstellungen bewahrt, wenn auch in anderen Punkten, z. B. durch die Beseitigung der Substratvorstellung der Elektrizität, d. h. der Friktionsteilchen, wesentliche Umwandlungen vorgenommen wurden, wie sogleich gezeigt werden soll.

Vor Eingehen auf diese Richtung, welche zu den Feldvorstellungen von HELMHOLTZ und HERTZ führte, möge aber noch auf eine andere Entwickelungsrichtung der MAXWELLschen Hülfsvorstellungen kurz eingegangen werden, nämlich auf die von OLIVER LODGE entwickelte Äthertheorie (siehe „Modern Views of Electricity“, London I. Aufl. 1889, II. Aufl. 1892; vgl. hierzu auch ROSENBERGER, „Die moderne Entwickelung der elektrischen Prinzipien“, Vortrag IV). Vorauszuschicken ist allerdings, dass LODGE nicht geneigt ist, seine Vorstellungen als Hülfsvorstellungen anzusehen, wie dies FARADAY und MAXWELL stets ausdrücklich bei den ihrigen betont haben, sondern als Wirklichkeit, wie aus dem unten Folgenden hervorgeht. Die imaginären Friktionsteilchen MAXWELLS werden dementsprechend unbedenklich mit dem Lichtäther identifiziert und der Zweiheit von Lichtäther und materiellen Molekülen bezw. Atomen volle physische Realität beigelegt.

Seine Annahmen, die sich in vielen Punkten an MAXWELL anlehnen, zwingen LODGE eine Zweiheit der Äther anzunehmen — von denen einer die positive und der andere die negative Elektrizität ist — und damit auch im Leiter die Gegenströmung wie bei der dualistischen Fludiumstheorie (vgl. **30** und **58**).

Als Begründung führt LODGE an:

Die Doppelheit der Zusammensetzung beim Medium — sein Zusammengesetztsein aus zwei genau gleichen Wesenheiten — ist nahegelegt durch die Thatsachen der Elektrolyse, durch die Abwesenheit des mechanischen Moments in Strömen und Magneten, und durch die Schwierigkeit, sich auf andere Weise ein Medium vorzustellen, das mit Starrheit begabt ist und doch vollständig flüssig ist gegenüber materiellen Massen, welche sich hindurchbewegen. Mit der Hypothese der Zweiheit der Zusammensetzung verschwindet diese letzterwähnte Schwierigkeit. Der Äther als Ganzes mag vollständig flüssig sein und Körpern den Durchgang ohne Schwierigkeit erlauben, während seine beiden Komponenten elastisch mit einander verbunden sein mögen und allen Kräften widerstehen mögen, welche sie zu trennen suchen, wie es ein fester Körper würde, wenn er die erforderliche Starrheit (rigidity) besässe.

Das Feld besteht dementsprechend auch nicht wie bei MAXWELL aus materiellen Wirbelmolekülen und den sehr viel kleineren Friktionsteilchen, sondern unter Abstraktion von den materiellen Molekülen als elektromagnetischen Faktoren, aus abwechselnd links und rechts drehenden Ätherwirbeln, die auch wie ineinandergreifende hier gleich grosse Zahnrädchen wirken und zur Erklärung der Zweiseitigkeit aller magnetischen und elektrischen Erscheinungen herangezogen werden.

Hingegen enthält ein metallischer Leiter nur ätherische Wirbelatome, die je nach der Reibung entsprechend dem elektrischen Leitvermögen leichter oder schwerer an einander vorübergleiten, während das Dielektrikum nur solche enthält, die wie durch Zähne fest in einander gekuppelt sind. „Gleitung (slip) ist Strom, Drehung (spin) ist Magnetismus . . . . die Gleitung vollzieht sich gänzlich in Richtung des Drahtes; die Achsen der Drehung stehen alle rechtwinklig hierzu.“

Als Kritik der Theorie von LODGE seien folgende treffende Sätze von ROSENBERGER (a. a. O., 133) angeführt, die nebst den Citaten aus Vorreden

von LODGE und von HELMHOLTZ zugleich eine geeignete Überleitung zu den modernsten Feldtheorien bilden:

Das Werk von LODGE erscheint als eine sehr verdienstliche That, weil es zum erstenmal alle elektrischen Erscheinungen aus einer fundamentalen Hypothese ohne Annahme fernwirkender Kräfte in sehr anschaulicher Weise erklärt. Dass dabei, um diese Anschaulichkeit zu erreichen, so grob zugehauene Modelle wie die Zahnräder des Dielektrikums angewandt werden müssen, die man als auch nur einigermassen genaue Bilder der Erscheinungen jedenfalls nicht annehmen kann, braucht uns dabei nicht weiter zu stören, denn sie sollen eben nichts weiter als mehr oder weniger zutreffende Analogieen sein, die man auch durch beliebige cyklisch bewegte Massen mit beliebigen, die Rotation von einem Cykel auf alle benachbarten übertragenden Kräfte ersetzen könnte. Freilich würden danach wieder der fundamentalen Hypothese eine unendliche Menge Nebenannahmen angefügt werden müssen, die die Wahrscheinlichkeit der ganzen Hypothese auf ein bedenklich geringes Mass zurückführen würden. Ob danach die Zeit für die volle Aufnahme des Äthers unter die unzweifelhaft realen Materien der Physik wirklich so kurz bevorsteht, als LODGE meint, das kann wohl nur die Zeit selbst lehren. Er selbst spricht darüber in der Vorrede zur ersten Auflage seiner Schrift mit einer ungewöhnlichen Sicherheit: „Die Existenz des Äthers lässt sich mit demselben Recht und in derselben Form bestreiten wie die Existenz der Materie. Aber auch nur so. Das Vorhandensein beider kann angezweifelt oder weggeleugnet werden, aber die Beweise für den Äther sind nichtsdestoweniger ebenso sicher und direkt wie der für die Luft. Es kann sein, dass meine Erklärungen im einzelnen noch unrichtig sind (obschon ich es nicht hoffen will); jedenfalls werden sie noch mancher Verbesserung bedürfen, was aber die Hauptlehre von dem Wesen der Elektrizität anbetrifft, so ist sie für mich, obwohl ich sie als „Anschauung" bezeichne, nicht Ansichtssache, sondern Sache der Überzeugung. Wenige Thatsachen in der Physik erscheinen mir sicherer als die, dass, was wir Elektrizität genannt haben, eine Form oder vielmehr eine Art der Bethätigung des Äthers ist. Dasjenige, was wir jetzt zu erforschen haben, ist nicht das Wesen der Elektrizität, sondern das Wesen des Äthers. Die Frage ist denn auch das Hauptproblem der physikalischen Welt unserer Zeit. Aber kein unlösbares; es steht vielmehr meiner Ansicht nach unmittelbar vor seiner Lösung. Die Theorie des mit der Materie verbundenen Äthers muss zunächst an die Reihe kommen. Durch diese muss neben allen optischen und elektrischen Erscheinungen auch die Schwerkraft und die Kohäsion erklärt werden. Sodann müssen die spezifischen Unterschiede zwischen den verschiedenen Arten der Materie und das Wesen ihrer sogenannten Verbindungen in Angriff genommen werden. Ist dies geschehen, so sind die zahlreichen unzusammenhängenden Thatsachen der Chemie unter ein zusammenfassendes Gesetz gebracht. Die nächsten 50 Jahre werden vielleicht Zeuge sein, wie der grössere Teil dieser gewaltigen Siege sich verwirklicht.

Diese etwas stark prophetischen Worte lassen sich am besten durch die allerdings etwas vorsichtigeren, aber für die Zukunft der neuen Theorie doch fast ebenso weittragenden ergänzen, mit denen unser Altmeister HELMHOLTZ noch kurz vor seinem Tode das letzte Werk seines grossen Schülers, die Mechanik von HERTZ, bevorwortete: „HERTZ hat durch diese Arbeiten der Physik neue Anschauungen natürlicher Vorgänge von dem grössten Interesse gegeben. Es kann nicht mehr zweifelhaft sein, dass die Lichtschwingungen elektrische Schwingungen, in dem den Weltraum füllenden Äther sind, dass dieser selbst die Eigenschaften eines Isolators und eines magnetisierbaren Mediums hat. Die elektrischen Oscillationen im Äther bilden eine Zwischenstufe zwischen den verhältnismässig langsamen Bewegungen, welche etwa durch elastisch tönende Schwingungen magnetisierter Stimmgabeln dargestellt werden, und den ungeheuer schnellen Schwingungen des Lichtes andererseits. Aber es lässt sich nachweisen, dass ihre Fortpflanzungsgeschwindigkeit, ihre Natur als Transversalschwingungen, die damit zusammenhängende Möglichkeit der Polarisationserscheinungen, der Brechung und Reflexion vollständig denselben Verhältnissen entsprechen, wie bei dem Licht und den Wärmestrahlen. Es ist gewiss eine grosse Errungenschaft, die vollständigen Beweise dafür geliefert zu haben, dass das Licht eine so einflussreiche und so geheimnisvolle Naturkraft, einer zweiten, ebenso geheimnisvollen, und vielleicht beziehungsreicheren Kraft, der Elektrizität, auf das engste verwandt ist. Für die theoretische Wissenschaft ist es vielleicht noch wichtiger, verstehen zu können, wie anscheinende Fernkräfte durch Übertragung der Wirkung von einer Schicht des zwischenliegenden Mediums zur nächsten fortgeleitet werden. Freilich bleibt noch das

Rätsel der Gravitation stehen, die wir noch nicht folgerichtig anders, denn als eine reine Fernkraft zu erklären wissen.

72. Vorstellung der Cykelbewegungen nach Helmholtz und Hertz.

Bei den neueren Theorien der Felderscheinungen spielen die namentlich von Helmholtz und Hertz näher untersuchten „Cykelbewegungen" eine grosse Rolle. Diese in sich zurücklaufenden, wirbel- oder kreiselartigen Bewegungen gestatten, sich die elektromagnetischen Zustände als Zustände „verborgener Bewegung" vorzustellen, wobei sie auch in vieler Beziehung direkt an das soeben erwähnte anschauliche Bild Maxwells anschliessen.

Der Begriff der „cyklischen" Bewegung umfasst also diejenigen in Bewegung befindlichen Systeme, bei denen die Konfiguration trotz der Bewegung dieselbe bleibt. Dazu ist erforderlich, dass die Bewegung nicht beliebig fortschreitend, sondern kreislaufartig in sich zurückkehrend ist, sowie dass jedes Teilchen, welches seinen Ort verlässt, durch ein bezüglich Beschaffenheit und Bewegung völlig gleichartiges ersetzt wird. Vollkommene oder echte Cyklen, wie sie mechanisch z. B. durch die gleichförmige Rotation eines homogenen Umdrehungskörpers oder das Fliessen einer Flüssigkeit in einer in sich zurückkehrenden ruhenden Rohrleitung dargestellt werden, besitzen also die Eigentümlichkeit, bewegt und ruhend den gleichen Anblick zu gewähren, und ihren Zustand nur bei der B e r ü h r u n g der cyklisch bewegten Teile zu verraten. Die Bewegung mit ihrem Energiegehalt ist also von aussen gesehen nicht sogleich oder direkt erkennbar, vielmehr dem Gesichtssinn „verborgen". In dieser Beziehung werden alle Cykelbewegungen einander gleichen, wodurch die Auffassung der elektromagnetischen Zustände als Cyklus, sowie ihre Analogisierung mit mechanischen Cyklen unterstützt wird. Bei den mechanischen Cyklen wird man neben jenen vollkommenen (echten) noch angenäherte oder unvollkommene (unechte) Cyklen wie Zahn- oder Speichenräder unterscheiden können, welche zwar jenem Begriff bezw. jener Cyklendefinition nicht vollkommen aber nahezu, zumal bei relativ rascher Bewegung, entsprechen. Jene Definition wird ferner nicht auf einfache Mechanismen, wie Kreisscheiben, beschränkt sein, sondern auch auf „gekuppelte Cyklen", wie z. B. durch Treibriemen verbundene Scheiben, passen. Geht man in dieser Kombination noch weiter, so wird man eine noch so verzweigte Transmissionsanlage als mechanisches cyklisches System erkennen und sich auch einen gegebenen Stromleiter mit allen seinen Feldwirbeln der gleichfalls zunächst als gegeben angenommenen Umgebung als Cykel denken können.

Die letzterwähnten Cyklen, deren Teile zwangläufig unter einander verbunden zu denken sind, werden die Eigentümlichkeit besitzen, dass die Geschwindigkeit und damit auch die Energie (lebendige Kraft) j e d e s beliebigen Teiles oder Massenpunktes in einem ganz bestimmten Verhältnis zu der Geschwindigkeit des Antriebspunktes steht, und dass nur die letztere (cyklische Geschwindigkeit) den Bewegungszustand des ganzen Systems charakterisiert, während der Winkel oder Bogenwert gegenüber der Anfangslage (cyklische Koordinate) hierbei keine Rolle spielt. In einem solchen mit dem Namen „Monocykel" belegten System wird sonach die Geschwindigkeit v_i irgend eines Teilchens i durch die für alle gemeinsam vorhandene „cyklische Geschwindigkeit q und einen auf die Lage bezw. die Verknüpfung (Umsetzungsverhältnis) sich beziehenden Faktor a_i ausgedrückt sein, so dass jeder Monocykel durch die Beziehung $v_i = a_i \cdot q$ charakterisiert ist.

Die Zusammenstellung der bei der Strombewegung geltenden Gesetze und der Gleichungen eines mechanischen Monocykels (siehe H I, 3, 73 § 62 oder auch EBERT, Kraftfelder, 312—313) zeigt die vollständige Analogie zwischen beiden und liefert den Beweis, dass die elektrische Strombewegung mechanisch betrachtet zu der Kategorie der monocyklischen gehört.

Die Auffassung der elektromagnetischen Feldenergie als „verborgene Bewegung“ mit Cykelcharakter muss durch das Vorhandensein so weitgehender Übereinstimmung gegenüber ihrer älteren Auffassung als sogen. „potentielle“ Energie (Distanzenergie) naturgemäss sehr an Berechtigung gewinnen.

Diejenigen Systeme mit Kreislaufbewegung (Kreislauf im weiteren Sinne genommen und nicht auf Bahnen mit mathematischer Kreisform beschränkt), bei denen die Geschwindigkeit jedes beliebigen Teiles im „Felde“ durch zwei von einander unabhängige cyklische Geschwindigkeiten, q_1 und q_2, bestimmt ist, bei welchen also mathematisch im einfachsten Fall für jene Geschwindigkeit v_i die Beziehung besteht:

$$v_i = a_i\, q_1 + b_i\, q_2$$

hat HELMHOLTZ als „Dicykel“ bezeichnet. Ein einfaches mechanisches Modell hierfür bietet das Planetenradgetriebe (vgl. Fig. 14 bis 16), während ein elektromagnetisches Dicykel von zwei durch Wechselinduktion in Beziehung stehenden Stromkreisen, z. B. einem sekundär belasteten Wechselstromtransformator, dargestellt wird. Eine Vermehrung der induzierten, aber in ihren Widerstandsverhältnissen unabhängig von einander variierten Wicklungen würde schliesslich zum Polycykel mit mehr als zwei unabhängig veränderlichen cyklischen Geschwindigkeiten führen, wobei man erhält:

$$v_i = a_i\, q_1 + b_i\, q_2 + c_i\, q_3 + \cdots\cdots$$

Praktisch wird man selten über das Dicykel hinausgeführt werden, auch wird alsdann die Übersehbarkeit am mechanischen Modell so schwierig, dass der Hauptnutzen mechanischer Hülfsvorstellungen fast ganz verloren geht, da für weitere Kreise nur gedanklich schnell und gleichsam automatisch auslösbare mechanische Hülfsvorstellungen praktischen Wert erlangen können.

73. Cykelmodelle für elektromagnetische Vorgänge.

Bereits MAXWELL hatte ein (gegenwärtig im Cavendish Laboratory in Cambridge aufbewahrtes) Dicykelmodell zur Veranschaulichung der Verknüpfung im unsichtbaren elektromagnetischen Dicykel (bei Wechselinduktion) konstruiert. BOLTZMANN hat eine weitere, sehr sinnreiche und in ihrer Leistung vielseitigere, aber etwas schwer übersehbare Modellkonstruktion zu diesem Zweck ausgeführt, und in der Zeichnung auch in seinen Vorlesungen über MAXWELLs Theorie (1891 bei A. BARTH, Leipzig) veröffentlicht. Etwas vereinfacht, aber für die mechanische Veranschaulichung der wichtigsten elektromagnetischen Vorgänge ausreichend ist folgendes von EBERT angegebene Modell (vgl. Magn. Kr. II, 319):

Fig 14 zeigt den Apparat in perspektivischer Ansicht; Fig. 15 ist ein vertikaler Durchschnitt desselben.

In den Lagern L_1 und L_2, Fig. 15, die von den Trägern T_1 und T_2 getragen werden, dreht sich die Achse A. Mit derselben sind fest verbunden: 1. das Schwungrad R, welches die Kurbel K (den Antriebspunkt) trägt; 2. die Scheibe S_1; 3. das Kegelrad K_1 und 4. der schwarze Zeiger Z_1. In den Rand der Scheibe S_1 ist eine Nut eingedreht, in

welche die Drahtschleife D_1 von der Feder F_1 verschieden stark hineingezogen werden kann, je nach der durch die Stellung der Schraube s_1 bestimmten Federspannung; wir lassen D_1 zunächst nur ganz lose auf S_1 aufliegen (reibungsloser Cykel). Die Achse A und R, S_1, N_1 und Z_1 bilden zusammen den ersten Cykel.

Auf dem linken Teile der Achse A sitzt, um diese frei beweglich die Hülse H; sie trägt: 1. das Kegelrad N_2; 2. die Scheibe S_2 mit dem auf ihr befestigten **roten** Zeiger Z_2. Die Scheibe S_2 ist wie S_1 mit einer Bremsvorrichtung (D_2, F_2, s_2) versehen, die wir jetzt aber nicht anziehen. Die Hülse H und N_2, S_2 und Z_2 bilden zusammen den zweiten Cykel.

Beide Cykel sind durch einen einfachen Zwischenmechanismus mit einander in Verbindung gesetzt: um die Mitte der Achse A dreht sich frei das cylindrische Stück M. An diesem sind in gegenüberliegenden Punkten die Stangen Q_1 und Q_2 befestigt, um die sich die Kegelräder N_3 bezw. N_4 drehen, welche in N_1 und N_2 eingreifen.

Durch Stellringe i, Fig. 15, welche auf die Achsen aufgeschraubt sind, wird bewirkt, dass die Teile M, H und die vier einander gleichen Kegelräder N sich um ihre bezw. Achsen drehen, aber nicht auf ihnen verschieben können.

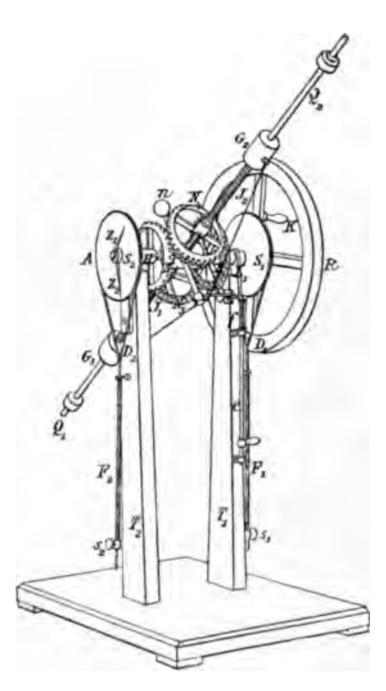


Fig. 14.

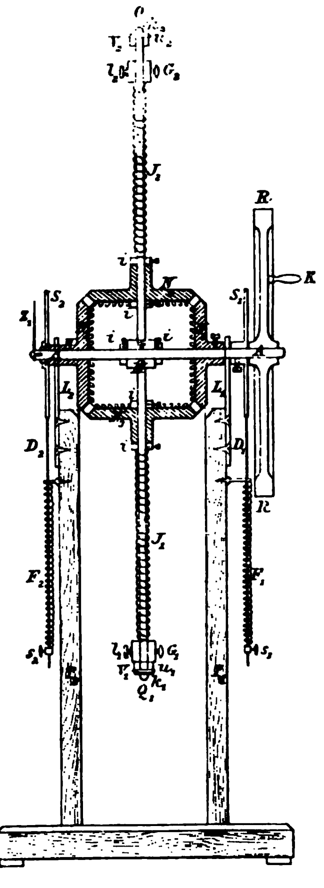


Fig. 15

Durch diese Kuppelung der beiden Cykel wird den Stäben Q eine Winkelgeschwindigkeit in Bezug auf die Achse A erteilt, welche immer gleich dem arithmetischen Mittel der beiden Winkel (cyklischen) Geschwindigkeiten q_1 und q_2 der beiden einzelnen Cykel ist.

Dies erkennt man leicht, wenn man zunächst einen der beiden Cykel, etwa das Kegelrad N_1 oder N_2 festhält und den anderen dreht; die Drehung verteilt sich zur Hälfte auf eine Drehung der Räder N_3 und N_4 um ihre Achsen, zur anderen Hälfte auf eine Drehung des ganzen Zwischenmechanismus um die Hauptachse A. Wirken gleichzeitig beide Cykel, indem der Antriebspunkt von N_1 in der Sekunde etwa um den Bogen p_1, der von N_2 um p_2 vorwärts bewegt wird, so ist das Resultat dasselbe, als wenn sich erst N_1 bei festgehaltenem N_2 um p_1, dann N_2 bei feststehendem N_1 um p_2 gedreht hätte; Das Stabpaar Q_1 Q_2 dreht sich dabei demnach um $\frac{1}{2}(p_1 + p_2)$ voran, seine Geschwindig-

keit ist also auch bei gleichzeitiger und gleichförmiger Bewegung beider Cykel $\frac{1}{2}(q_1 + q_2)$. Dreht sich N_2 im entgegengesetzen Sinne wie N_1, so ist q_1 mit dem umgekehrten Zeichen — in Rechnung zu setzen. In der That: drehen sich beide Cykel gleich schnell, aber im entgegengesetzten Sinne, so laufen die Kegelräder N_3 und N_4 an beiden gleich schnell ab und der Zwischenmechanismus bleibt stehen. Ein Punkt desselben, der um r_i cm von der Achse entfernt ist, hat also im allgemeinen die Geschwindigkeit

$$v_i = \frac{r_i}{2} q_1 + \frac{r_i}{2} q_2,$$

was mit der für die Dicykelsysteme aufgestellten einfachsten Bedingung

$$v_i = a_i q_1 + b_i q_2$$

übereinstimmt; hier haben die die Art der Verknüpfung näher charakterisierenden Grössen a_i und b_i eine besonders einfache Bedeutung.

Auf den Stäben Q_1 und Q_2 verschieben sich die Gewichte G_1 und G_2; je nach der Stellung derselben ist das Trägheitsmoment T des Zwischenmechanismus verschieden gross.

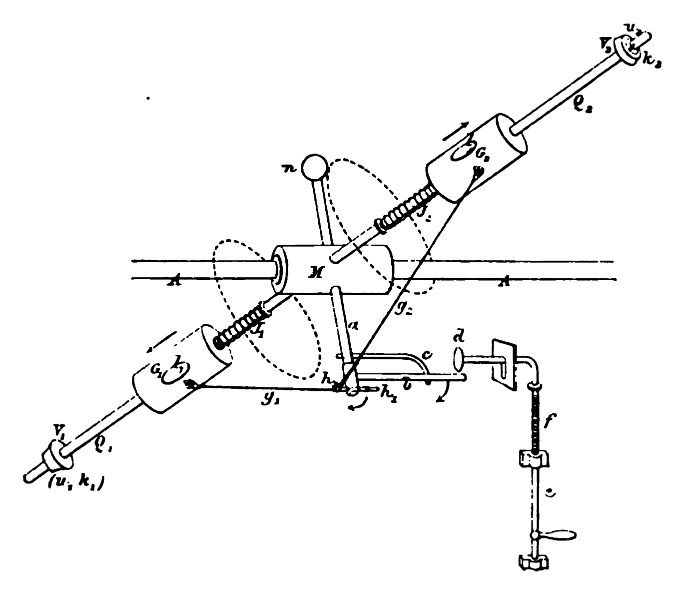


Fig. 16.

Die Anordnung ist so getroffen, dass man während der Drehung die Entfernung r der Gewichte von der Achse vergrössern oder verkleinern und damit das Trägheitsmoment T verändern kann.

a) Um r während der Drehung vergrössern zu können, werden auf die Stäbe Q_1 und Q_2 die Federn J_1 und J_2 geschoben (vgl. Fig. 16, in der der mittlere Teil des Apparates noch einmal besonders abgebildet ist; die um Q_1 und Q_2 drehbaren Kegelräder N_3 und N_4 sind nur durch punktierte Linien angedeutet), dann die Gewichte G_1 und G_2, die mit Schrauben und Ösen versehen sind, zuletzt die Gummipolster V_1 und V_2, die sich gegen die Unterlegscheiben u_1 und u_2 mit dahinter durch die Stäbe Q_1 und Q_2 gesteckten Stiften k_1 und k_2 legen.

Um das Ende des in M befestigten zu Q_1 und Q_2 senkrecht stehenden Stabes a dreht sich der Hebel b mit den Stiften h_1 und h_2. Man schiebt die Gewichte möglichst nahe an die Achse A heran, indem man die Federn J_1 und J_2 zusammendrückt, schraubt sie fest, hängt die mit Haken und Schleifen versehenen Schnüre g_1 und g_2 mit ihren Heften in die Ösen der Gewichte und schiebt die Schleifen derselben über die Stifte h_1 und h_2. Legt man dann den Hebel b hinter den mit a fest verbundenen Arm c, so kann man die Klemmschrauben der Gewichte lösen, ohne dass sie sich von ihren Orten auf den Stäben Q_1 und Q_2 entfernen.

Die Gewichte werden frei und durch die Federn J_1 und J_2 nach aussen getrieben, sowie man gegen die nach oben treibende Feder f die am Träger T_1 (Fig. 14) bewegliche Stange e und damit die Scheibe d nach unten zieht; denn dadurch wird b etwas nach unten gedrückt und gleitet von dem Ende des haltenden Stabes c ab. Die Auslösung erfolgt, gleichgültig in welchem Sinne man dreht.

b) Soll r während der Drehung verkleinert werden, so nimmt man die Stifte h_1 und h_2 aus den Stangen Q_1 und Q_2 heraus, nimmt V, G und J ab, schiebt zunächst die Gummipolster V auf die Stäbe, dann die Gewichte G, von denen man die Schnüre entfernt, schliesslich die Federn J, und hält diese auf den Stangen durch die Unterlegscheiben u fest, hinter denen man die Stifte k wieder einschiebt. Man drückt die Federn J zusammen und schraubt die Gewichte in möglichst grosser Entfernung von der Achse A auf den Stäben Q fest. Um sie hier auch zu erhalten, nachdem man die Schrauben gelöst hat, sind an den Gewichten die etwas ausgestochenen Lager l_1 und l_2 (Fig. 15) befestigt. Zwischen ihre beiden Platten werden kleine Holzstäbchen gesteckt, die sich mit ihren anderen Enden gegen die Stifte h_1 und h_2 der Auslösevorrichtung stemmen. Wird durch Ziehen an e (Fig. 16) die Scheibe d heruntergedrückt, so fliegen die Holzstäbchen heraus, wenn der Arm b bei der Drehung an die Scheibe d kommt, und die Gewichte werden durch die Federn nach innen getrieben.

Die in Figg. 14 und 16 sichtbare kleine Kugel n dient zur Ausbalancierung.

Stellt man die Bewegungsgleichungen für den hier beschriebenen Mechanismus auf, so erhält man zugleich die Induktionsgesetze.

Sind in der von uns gewählten Bezeichnungsweise p_1 und p_2 die cyklischen Variabeln, d. h. die Winkeldrehungen der beiden um dieselbe Achse drehbaren Systeme: (R_1, A_1, S_1, N_1, Z_1) und (N_2, H, S_2); $q_1 = dp_1/dt$ und $q_2 = dp_2/dt$ die cyklischen (Winkel-)Geschwindigkeiten, r_1 und r_2 die bezüglichen Trägheitsmomente, so sind die kinetischen Energien der beiden Cykelbewegungen: $\frac{1}{2} r_1 q_1^2$ und $\frac{1}{2} r_2 q_2^2$. Sind m die Massen, r die Abstände der Gewichte G_1 und G_2 von der Achse, ist r_3 das Trägheitsmoment aller übrigen Massen des Zwischenmechanismus (also von M, Q_1, Q_2, N_3, N_4, V_1, V_2, a, b, c, k), so ist das Gesamtträgheitsmoment des Zwischenmechanismus $T = r_3 + 2\,m\,r^2$. Die kinetische Energie, die in ihm angehäuft ist, ist $\frac{1}{8}\,T(q_1 + q_2)^2$. Die gesamte kinetische Energie des Systems ist demnach:

$$\mathfrak{L} = \tfrac{1}{2} L_1 q_1^2 + \tfrac{1}{2} L_2 q_2^2 + M q_1 q_2,$$

wenn wir setzen

$$L_1 = r_1 + \tfrac{1}{4} T,\ L_2 = r_2 + \tfrac{1}{4} T,\ M = \tfrac{1}{4} T.$$

Die Momente sind.

$$\left.\begin{aligned} s_1 &= d\,\mathfrak{L}/d\,q_1 = L_1 q_1 + M q_2 \\ s_2 &= d\,\mathfrak{L}/d\,q_2 = L_2 q_2 + M q_1 \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (58)$$

Die an den cyklischen Variabeln angreifenden Systemkräfte sind

$$P'_1 = \frac{d\,s_1}{d\,t};\ P'_2 = -\frac{d\,s_2}{d\,t} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (60)$$

q_1 ist identisch mit der Stromstärke des induzierenden, q_2 mit der des induzierten Stromes; P'_1 und P'_2 sind die in den entsprechenden Stromkreisen auftretenden EMK; L_1 und L_2 sind die Selbstinduktionskoeffizienten der beiden Stromkreise. M ist der Koeffizient der wechselseitigen Induktion.

Die Gleichungen des mechanischen Modells stimmen also mit den allgemeinen Stromgleichungen am Wechselstromtransformator

$$E_1 = -L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt}$$

$$E_2 = -L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt}$$

überein, wenn man zunächst von den Reibungswiderständen bezw. den ohmischen Widerständen abstrahirt.

74. Verborgene Bewegung

Die bei MAXWELLS mechanischen Hülfsvorstellungen benutze Fiktion der Friktionsteilchen schliesst sich durch die Auffassung des elektrischen Stromes

an Stelle verborgener Masse.

als bewegten Substrates in diesem Punkte noch an die älteren Fluidumsvorstellungen an. Die Entwickelung der mechanischen Hülfsvorstellungen in den letzten zwei Jahrzehnten des XIX. Jahrhunderts schloss zwar an MAXWELL an, suchte aber mit Hülfe der von HELMHOLTZ näher untersuchten Wirbelbewegungen und des weiteren Ausbauens der Cykelvorstellungen die Substratvorstellung nach Möglichkeit zu eliminieren.

Die Entwickelung der neuesten Zeit auf energetischer Grundlage stellt sich somit als das Ende einer Vorstellungsreihe dar, bei welcher zwar durch MAXWELLS Hülfsvorstellungen ein Übergang von den älteren Vorstellungen zu den neuen energetischen Vorstellungen ermöglicht ist, jedoch im wesentlichen eine direkte Umkehrung der Auffassung Platz gegriffen hat. Bei den älteren Fluidumsvorstellungen wird dem Medium überhaupt keine Rolle zuerteilt, sondern die Hauptvorgänge werden in bezw. auf den Stromleiter und den Magnet verlegt, und die Wirkung auf entfernte Leiter oder Magnete soll mit Hülfe von unfassbaren Fernwirkungen „erklärt" werden. Diese Vorstellungsgruppe kann man also vielleicht als diejenige der reinen Substratvorstellungen kennzeichnen, denn sie arbeitet nur mit unsichtbaren Fluidis (elektrischen und magnetischen), welche man im gewissen Sinne als „verborgene Massen" bezeichnen könnte. Wie sogleich gezeigt werden soll, spielt bei den unten folgenden Vorstellungen das Medium weitaus die Hauptrolle, so sehr, dass nicht nur der Sitz der Energie völlig in dasselbe verlegt, sondern auch bei elektrischen Ausgleichvorgängen der Leiter gleichsam degradiert wird, indem die Vorgänge in ihm als das Sekundäre erscheinen und er als das „Energie verwüstende" Moment angesehen wird, weil die primär vorhandene Feldenergie in ihn „hineinwandert" d. h. sich als magnetische Energieform an ihm zu Tode reibt (in Wärme übergeht); diese Vorstellungsgruppe kann man als diejenige der reinen Bewegungsvorstellung kennzeichnen, da sie hauptsächlich mit „verborgenen Bewegungen" des Mediums operiert. Die im Vorausgehenden entwickelten Hülfsvorstellungen von MAXWELL nehmen eine vermittelnde Stellung zwischen diesen beiden Vorstellungsgruppen ein: einerseits ist die Substratvorstellung der Elektrizität in Gestalt der Friktionsteilchen noch beibehalten und der im Leiter fliessende Strom gilt als das Primäre, das magnetische Feld vom Leiter aus Erzeugende; andererseits ist aber energetisch Übereinstimmung mit der zweiten Gruppe vorhanden, insofern der Sitz der Energie völlig in das Medium verlegt ist und dem letzteren dementsprechend auch die Übertragung mit Hülfe von mechanischen Bewegungsvorgängen zugeschrieben wird.

Vor Vergleichung der beiden letzteren Auffassungsweisen in wissenschaftlicher Beziehung und hinsichtlich ihrer praktischen Nutzbarkeit soll jedoch erst die Anführung der neueren Vorstellungen folgen, wie sie als mechanische Hülfsvorstellungen zunächst wohl von englischen Physikern (vgl. O. HEAVISIDE, Electrician, Janunar 1885, J. H. POYNTING, 1885, Phil. Trans. 2, 277, ferner O. LODGE, FITZGERALD) entwickelt, unter den deutschen Autoren aber namentlich von H. EBERT in seinem Werk „Magnetische Kraftfelder") weiter ausgebildet wurden: die letzteren sollen als die am besten durchgebildeten Vorstellungen in erster Linie berücksichtigt werden.

Auch bei diesen Vorstellungen wird, ähnlich wie bei MAXWELL, das magnetische Feld, welches hier die Hauptstellung einnimmt, und dessen Beschaffenheit gleichsam den Kernpunkt der ganzen Anschauungsweise ausmacht, als aus ringförmig geschlossenen „Wirbelfäden" aufgebaut gedacht,

jedoch sind dieselben längs der Wirbelachse (Kraft- bezw. Induktionslinie) zusammenhängend ohne die Zelleneinteilung MAXWELLS vorzustellen, ähnlich wie Rauchwirbelringe oder die von HELMHOLTZ untersuchten Wirbelfäden in Flüssigkeiten. Überhaupt werden die charakteristischen Eigenschaften dieser Wirbelbewegung den einzelnen Wirbelringen des magnetischen Feldes zugeschrieben; das Charakteristische besteht darin, dass die Wirbelbewegung dauernd an bestimmte Flüssigkeitsteilchen (Mediumsteilchen) gebunden ist und mit diesen fortschreitet. Gegenüber der Wellenbewegung, welche ein Medium durchlaufend immer neue Teilchen nach einander ergreift und nach einer schwingenden Bewegung wieder zur Ruhe kommen lässt, ist also ein wesentlicher Unterschied vorhanden, da hier die einmal wirbelnden Teilchen dauernd um ihre Wirbelachse, und zwar mit einer dem Abstand von letzterer direkt proportionalen Wirbelgeschwindigkeit, rotieren, gleichgiltig ob die Wirbel*achse* stille steht oder fortschreitet. Wie HELMHOLTZ nachgewiesen hat, bleibt bei Abwesenheit von Reibung diese Wirbelbewegung unbegrenzt lange bestehen. Im ruhenden magnetischen Felde, wie es z. B. ein permanenter Magnet hervorruft, hätte man sich den ganzen Raum um den Magneten mit solchen reibungsfrei rotierenden Wirbelröhren ausgefüllt zu denken. Eine gegenseitige Störung der benachbarten, notwendig im entgegengesetzten Sinne rotierenden Wirbelseiten (vgl. Fig. 6 und 12, welche beim Wegdenken der Friktionsteilchen den Querschnitt durch benachbarte Wirbelröhren auch bei dieser Vorstellung andeuten würde), findet nach der Wirbeltheorie von HELMHOLTZ nicht statt.

75. Feldmodell nach Ebert.

Für die Übertragung der Wirbelintensität bei veränderlichem Feld ist aber auch bei dieser Vorstellung ein Übertragungsglied nötig, welches denselben Dienst wie die Friktionsteilchen leistet. In dem Feldmodell von EBERT ist hierfür zur Wahrung des echten Cykelcharakters eine treibriemenartige Schnurlaufübertragung zwischen allen benachbarten Wirbelröhren gewählt, wodurch die Gleichsinnigkeit aller die Wirbelquerschnitte des Feldes darstellenden Rädchen gewährleistet ist. Denkt man sich diese Schnurlaufverbindungen elastisch, z. B. aus nicht gleitenden Kautschukfäden hergestellt, so gestattet ein solches Feldmodell nicht nur die magnetische bezw. elektrodynamische Seite der Erscheinungen zu veranschaulichen, sondern auch die elektrostatische, d. h. die Spannungszustände im Dielektrikum und zwar beide Feldzustände bezw. Bewegungserscheinungen in Übereinanderlagerung, so dass auch die Rolle der Friktionsteilchen bei der dielektrischen Verschiebungsvorstellung durch das Modell unter Beseitigung der Substratvorstellung übernommen wird. Dies wird in folgender Weise ermöglicht:

Man betrachte zunächst die mechanischen Verhältnisse bei folgendem Mechanismus als Modell eines elastisch gekoppelten Cykels (vgl. Fig. 17 und 18, sowie EBERT, 302 u. ff.):

Eine Reihe von gleichgrossen Rollen mit parallelen Achsen (Fig. 17) sind paarweise durch je einen straffgespannten, in sich zurücklaufenden Gummifaden miteinander verbunden; die erste Rolle trägt im Abstande 1 von der Achse eine als Antriebspunkt dienende Kurbel, die letzte kann durch eine Schraube beliebig stark gebremst werden.

Die Ausführung im einzelnen ist die folgende:

Modell der elastisch gekoppelten Rollenreihe.

An einem schmalen, horizontal liegenden dicken Brette A (Fig. 17) ist das senkrechtstehende ebenfalls kräftige Brett BB befestigt, an dem neun starke, vorn und rückwärts

mit Gewinden versehene Achsen *a* (Fig. 18) durch Flanschen und Gegenmuttern in horizontaler Lage festgeschraubt sind. Auf diese Achsen sind die ca. 14 cm im Durchmesser haltenden Holzscheiben *s* (Fig. 18) gesteckt, von denen jede eine Scheibe *r* von etwa 4 cm Durchmesser trägt, in die je vier Riefen von dreieckigem Querschnitt eingetieft sind. (Vorläufig werden nur je zwei derselben gebraucht, damit die Rollen aber auch bei dem später zu beschreibenden Feldmodelle verwendet werden können, versehen wir sie mit vier Riefen.) Die Scheiben *s* sind am Rande ausgedreht und hier ist auf dieselben ein Bleirohr *b* gelegt, welches zu einem beschwerenden Ringe zusammengelötet ist, wodurch

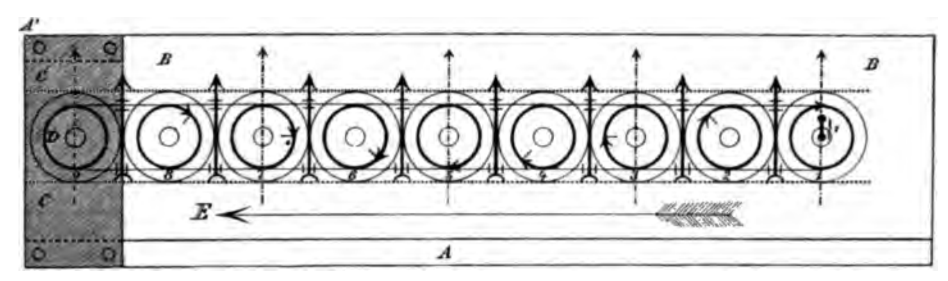


Fig. 17.

die Rollen ein erhebliches Trägheitsmoment erhalten und schon bei verhältnismässig kleinen Umdrehungsgeschwindigkeiten eine grosse Menge kinetischer Energie in sich aufspeichern können. Am Abgleiten von den Achsen werden die Rollen durch Muttern *m* gehindert. Über je zwei Rollen ist ein in sich zurücklaufender Gummifaden gelegt, der so straff gespannt ist, dass er sich fest in die Riefen einlegt und die Drehung der Rollen selbst bei starker Drehungsverschiedenheit von einer zur anderen ohne merkliche Gleitung vermittelt. Im Ruhezustande wird jede Rolle mit einem nach oben gerichteten Striche (Fig. 17) versehen, dessen Bogenentfernung von der Vertikalen für jedes der hier gekoppelten Elemente bei der Drehung die Entfernung aus der Ruhelage (cyklische Koordinate) erkennen lässt. Die letzte, neunte Rolle ist in einem Kasten verborgen, der durch einen unten auf *A*, oben auf ein gleichweit nach vorn überstehendes Brett *A'* aufgelegten Deckel *CC* vorn geschlossen ist. Die durch *CC* hindurchragende Mutter *m* kann so fest angezogen werden, dass die Bewegung der Rolle 9 ganz gebremst wird; in Fig. 17 ist diese „Druckschraube“ mit *D* bezeichnet.

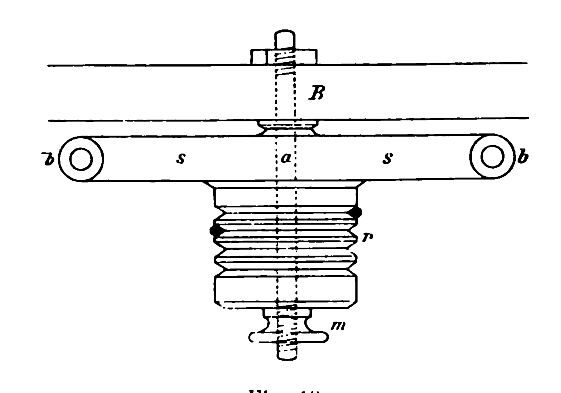


Fig. 18.

Die Rollen und die sie verbindenden Gummifäden bilden eine Reihe von „Elementenpaaren“ im Sinne der Kinematik, wie sie der Maschinenbauer verwendet, um Energie zu übertragen. Das wesentliche Merkmal solcher „kinematischer Koppelungen“ besteht darin, dass sich die beiden Elemente eines Paares (Rolle und Riemen) gleitungslos von einander abwickeln.

Versuch a) Die letzte, neunte Rolle (Fig. 17), werde zunächst nicht gebremst; wird dann die erste in Umdrehung versetzt, so werden in kurzer Zeit die Rollen dieselbe gleichförmige Drehungsgeschwindigkeit besitzen. Die einzelnen Elemente veranschaulichen dann die Bewegungen in einem schmalen streifenartigen Teile eines homogenen magnetischen Kraftfeldes. Wird, wie in der Figur angenommen, nach rechts gedreht, so geht der Sinn der Kraftlinien von vorn nach rückwärts, vor der Zeichenebene ist der Kraftlinien aussendende Nordpol, hinter derselben der Südpol zu denken. In dem System ist bei konstanter Umdrehungsgeschwindigkeit aller Elemente nur eine Form von Energie vorhanden, in unserem Beispiele kinetische (von den geringen Reibungsverlusten sehen wir ab).

Versuch b) Durch die Druckschraube D wird die letzte Rolle etwas gebremst; sofort treten in den Gummifäden Spannungen auf, alle oberen Teile der koppelnden Elemente sind gespannt, alle unteren sind locker. Bezeichnen wir die Richtung „ungespannt nach gespannt" durch Pfeile, so haben wir bei Rechtsdrehung der Kurbel an Rolle 1 alle Pfeile nach oben zu ziehen. Zwischen je zwei benachbarten Rollen bestehen Unterschiede der Drehung, wie in Fig. 17 durch die von links nach rechts immer weiter voranstehenden Striche und Pfeilspitzen angedeutet ist; die Figur stellt den Fall dar, wo die Bremsung so stark ist, dass die neunte Rolle gerade um eine ganze Umdrehung hinter der Antriebsrolle 1 zurückbleibt.

Die kinetische Energie, welche wir durch eine auf den Antriebspunkt wirkende Kraft P in die erste Rolle hineingeben, überträgt sich zum Teil allerdings noch immer als kinetische Energie auf die folgenden Rollen, zum Teil existiert sie aber auch als Energie elastischer Spannung in den Gummifäden. An der letzten Rolle endlich wird die von rechts her fortwährend zufliessende Energie in Wärme transformiert. Soll die Drehung im Gange bleiben, so muss andauernd Energie bei 1 in das System gegeben werden (Energie geordneter Bewegung); umgekehrt findet das erneute Heranwandern von Energie nur so lange statt, als bei D Energie aus dem System genommen und in Wärme verwandelt wird. Wir haben hier das Beispiel einer Energiewanderung im Sinne des Pfeiles E (Fig. 17) vor uns.

Die Analogie mit den Fällen der Transformation von Feldenergie in Wärme beim Stromträger tritt ohne weiteres hervor. Denken wir uns die ganze Fig. 17 um eine durch die Mitte der Rolle 9 gehende vertikale Achse gedreht, so haben wir ein Bild eines kurzen Stückes eines konachsialen Stromfeldes vor uns (vgl. hierzu auch Fig. 12); der Kasten $A'\,C\,C$ mit der in ihm verborgenen Rolle mit Reibung an ihren Lagern stellt den Stromträger vor mit seinem in seinen Einzelheiten unserem Verständnis noch verschlossenen Transformationsmechanismus.

Die zu konzentrisch den Träger umschliessenden Röhren ausgezogenen Rollenquerschnitte repräsentieren die Kraftröhren des Magnetfeldes. Die Energie fliesst von aussen her (Pfeil E) an den Leiter heran, um in ihm in Wärme verwandelt zu werden; die elektrische Spannung wirkt dem Leiter parallel.

Wir haben hier nur ein Bild der Vorgänge beim galvanischen Strome, aber ein sehr viel vollkommneres, zutreffenderes und aussichtsreicheres als das Strömungsbild der älteren Anschauungen ....

Versuch c) Die Rolle No. 9 (Fig. 17) wird durch die Druckschraube D so stark gebremst, dass sie sich gar nicht mehr bewegen kann. Dann wird an ihr auch keine Bewegungsenergie durch Reibung in Wärme umgewandelt. Wird Rolle 1 nach rechts aus der Gleichgewichtslage gedreht (Stromquelle), so werden auch alle folgenden Rollen gedreht (Magnetismus), aber die Drehung kann bei gegebener Kraft P nur bis zu einem bestimmten Betrage fortgesetzt werden, nämlich nur solange, bis die elastische Rückwirkung aller Gummifäden auf die erste Rolle gerade gleich P geworden ist. Dann steht die Maschine still. Alle Energie, welche an 1 gewirkt hat, ist in Form von Spannungsenergie aufgehäuft.

Das Medium befindet sich im dielektrischen Zwangszustande. Die Stärke desselben hängt von der Natur des Zwischenmittels, hier von der Länge, der Dicke und dem Elastizitätskoeffizienten ε der Fäden ab.

Lässt man den Antriebspunkt an Rolle 1 plötzlich los, so entspannen sich die Fäden, Drehung (magnetische Kraft) tritt auf, die Spannungsenergie verwandelt sich in kinetische. Da die Rollen, namentlich die in rasche Bewegung geratenen ersten, bei ihrer Rückkehr zur Gleichgewichtslage dieselbe überschreiten, so tritt wieder ein teilweises Spannen der Fäden ein, Spannungsenergie entwickelt sich; die Richtung der dielektrischen Polarisation ist jetzt aber die umgekehrte wie vorhin; dieselbe verwandelt sich wieder in Drehung (magnetische Kraft) u. s. f.: man erhält „Schwingungen". Wenn die Rollenreihe mit anderen benachbarten gekoppelt ist, so werden die Schwingungen auf dieselben übertragen („elektromagnetische Strahlung").

Das Modell versinnbildlicht noch einige andere Analogien mit elektromagnetischen Zwangszuständen: man darf die Spannung nicht zu weit treiben, sonst reisst ein Faden, „das Medium bricht unter der Wirkung der dielektrischen Spannung nieder". Dann lösen sich mit einemmale auch die Spannungen in allen übrigen Fäden, die aufgehäufte Energie „entladet sich".

Bei den entsprechenden elektrischen Vorgängen findet dies gewöhnlich in der Form eines Funkens statt. Das stärkste elektrische Feld, was wir in Luft von Atmosphären-

druck erzeugen können, ohne die elektrische Festigkeitsgrenze derselben zu überschreiten und dadurch Entladungen herbeizuführen, ist erfahrungsgemäss ungefähr 30000 Volt für die Länge eines Centimeters (Spannungsgradient).

Die vorstehenden Betrachtungen führen zu dem Begriffe der „ungeschlossenen Ströme", welche sich längs eines Trägers, der nicht zu einem metallischen Schliessungskreise vereinigt ist, ausbilden. Das Studium derselben hat seit HERTZ eine grosse Bedeutung erlangt.

Die Bezeichnung „ungeschlossen" bezieht sich, wie das Beispiel, an das wir anknüpften, zeigte, auf die metallische Leitung. Da sich die Feldbewegungen und -Spannungen auch durch das isolierende Zwischenmittel hindurch fortsetzen, so reicht bei den neueren Auffassungen der Begriff des „Stromes" viel weiter als das „Strömungsbild" es erlaubte, da er bei diesem naturgemäss auf den Leiter selbst beschränkt war. Die dielektrischen Polarisationen setzen den um den „Leiter" herum sich abspielenden Prozess in den die metallische Leitung trennenden Zwischenraum hinein fort. Diese erweiterte Auffassung bezüglich der ungeschlossenen Ströme bildete einen der wesentlichsten Punkte, durch die sich die MAXWELLsche Theorie von den älteren Anschauungen unterschied. Hier konnte das Experimentum crucis einsetzen, welches HERTZ anstellte: nach diesem giebt es also ungeschlossene Ströme im eigentlichen Sinne überhaupt nicht (vgl. auch „MAXWELLS Verschiebungsstrom").

76. Vergleich von Maxwells und Eberts Elektromechanik.

Die an dem vorstehenden Modell auftretenden mechanischen Bewegungs- und Spannungsverhältnisse gestatten einen deutlicheren Hinweis auf die Vorstellungen, welche die Vertreter der neueren energetischen Auffassungen sich von den elektromagnetischen Vorgängen machen. Bezüglich des Vergleichs mit den MAXWELLschen Hülfsvorstellungen sei darauf hingewiesen, dass Fig. 17 der Hälfte von Fig. 5 bezw. 12 entsprechen würde. Jedoch ist folgender wesentliche Unterschied vorhanden: bei MAXWELL beginnt zuerst das Strömen der in bestimmter Richtung von der Stromquelle gedrückten Friktionsteilchen im geschlossen gedachten Leiter und von diesem aus geht unter Energiewanderung aus dem Leiter in das Feld die Ausbreitung der Feldbildung vor sich, wobei die Stromwärme im Leiter durch Reibung der die Elektrizität darstellenden Friktionsteilchen bei ihrer Wanderung zwischen den Leitermolekülen hindurch gedeutet wird. Bei EBERT wirkt die „Stromquelle" zunächst auf die Feldwirbel (vgl. unter Versuch c), d. h. auf die Umgebung des „Stromquellenpoles" nebst angrenzendem Leitungsstück durch Erteilung eines Antriebes (in Fig. 17 auf Wirbel 1). Diese Feldenergie pflanzt sich in Richtung nach dem Leiter fort und geht bei geschlossenem Leiter durch Reibung der den Leiter unmittelbar begrenzenden Wirbelringe am Leiter zum Teil als magnetische Feldenergie verloren, d. h. erleidet eine Umsetzung in Wärme. In diesem Fall wird bei stationärem Ausgleichzustand (konstante Stromstärke) diese verlorene Energie stetig wieder durch neue Energie, welche von der Stromquelle durch das „Feld" an den Leiter heranwandert, ersetzt. Die Energiewanderung findet also nach dieser Auffassung im umgekehrten Sinne statt, und der Leiter erscheint nicht als das belebende, sondern als das vernichtende Element. Die Rolle der „Trägheit" der Feldwirbel zur Erklärung der als elektromagnetische Trägheit aufzufassenden Selbstinduktion ist bei beiden Auffassungen (MAXWELL und EBERT) im wesentlichen die gleiche. Ein merklicher Unterschied besteht jedoch wieder bezüglich der Vorstellung des dielektrischen Spannungszustandes. Das in Richtung des Leiters verlaufende Spannungsgefälle, welches im umgebenden Dielektrikum (Isolator) vorhanden ist, stellt sich bei MAXWELL ganz ähnlich wie im Falle der dielektrischen Kondensatorschicht zwischen den beiderseitigen Belegungen mit elektrischer Druckdifferenz (vgl. Fig. 7 bis 9), als eine elastische Verschiebung der Friktionsteilchen des Dielektrikums dar;

die dielektrische Polarisation (bei einer elektrostatischen Ladung oder überhaupt bei einem Spannungsgefälle innerhalb eines Dielektrikums) erscheint also hier bei MAXWELL unter dem Bilde einer wirklichen Verschiebung (displacement). Beim Aufgeben der Substratvorstellung der „Elektrizität" ist diese mechanische Darstellung der „Elektrisierung" nicht mehr möglich, sondern muss durch einen anderen Spannungszustand ersetzt werden. Bei EBERT geschieht dies durch die Differenz der Spannung, welche das hin- und zurücklaufende Trum des Gummifadens aufweist, der die cyklische Verbindung der Feldwirbel ermöglicht. Maschinentechnisch ausgedrückt würde bei parallelem Verlauf von ziehendem und gezogenem Trum (vgl. Fig. 17 und 18), die Richtung der elektrostatischen Drucklinie (Kraftlinie bezw. Induktionslinie) senkrecht zu den Gummifäden, und zwar vom gezogenen zum ziehenden Trum verlaufen, d. h. stets in der Richtung vom ungespannten zum gespannten Faden. Positiv und negativ oder + und — würde also bei dieser Vorstellung die Seite, nach welcher die „gespannten" bezw. entspannten Seiten der dielektrischen Gummifäden gerichtet sind, darstellen. Die Stärke der Spannungsdifferenz eines Fadenpaares multipliziert mit der Anzahl der aufeinander folgenden Paare, wenn man senkrecht zu ihnen, d. h. in Richtung des Stromleiters (vgl. Fig. 17) oder beim Kondensator von der positiven zur negativen Belegung quer durch die dielektrische Zwischenschicht fortschreitet, giebt ein Mass für die gesamte Spannungs- oder Druckdifferenz; auch hier lassen sich die dielektrischen Eigenschaften, ähnlich wie oben bei MAXWELL angedeutet, durch die Beschaffenheit der Gummifäden bezüglich Dehnbarkeit, innerer Reibung (dielektrische Hysteresis) u. s. f. analogisieren; in ganz ähnlicher Weise wie dort (vgl. 65) ergiebt sich auch die Ableitung des Kapazitätsbegriffes, der Grösse des Verschiebungsstromes u. s. w. (vgl. EBERT, 315 u. ff.) Auch hier besteht bezüglich der Einwanderung der Energie, welche während der Spannung des Dielektrikums (Herstellung seines Zwangszustandes) in ihm aufgespeichert wird, ein Unterschied zwischen beiden Auffassungen. Während bei MAXWELL diese Energie von den Belegungen aus und senkrecht zu ihnen in die dielektrische Zwischenschicht durch Verschiebung der Friktionsteilchen hineingeführt wird (vgl. Fig. 9), wandert bei EBERT die dielektrische Spannungsenergie von der Seite her, d. h. parallel zu der Belegung, in die Zwischenschicht ein. Um Fig. 17 zur Darstellung des Falles einer zu ladenden dielektrischen Kondensatorschicht zu benutzen, wäre der schraffierte Teil mit Wirbel 9 wegzudenken; alsdann würden die punktierten Begrenzungsstriche die beiden Kondensatorbelegungen darstellen, die dazu senkrecht stehenden strichpunktierten Pfeile die Richtung der Spannung (NB. vom ungespannten zum gespannten Gummifaden) und Pfeil E die Richtung der einwandernden Energie angeben.

Für die zuletzt erwähnte Auffassung ist bei Übereinanderlegung des magnetischen und elektrischen „Feldes", wie eine solche bei jedem stromdurchflossenen Leiter vorliegt, eine bequeme Regel für den Zusammenhang der Richtung der wandernden Energie mit der Richtung der magnetischen und der elektrischen Kraft von Wichtigkeit, besonders aber dann, wenn man es mit variierenden oder die Richtung wechselnden Grössen (Spannung und Strom) zu thun hat. Benutzt man für diesen Fall wiederum das Modell in Fig. 17, und bedenkt, dass die Richtung der magnetischen Kraft, angegeben durch die senkrecht zur Zeichnungsebene stehenden magnetischen

Kraftlinien (Wirbellinien), mit der Drehrichtung der Rollen 1 bis 9 ihr Zeichen wechselt und nach Übereinkunft bei Drehung im Uhrzeigersinn vom Beschauer fort, d. h. in die Zeichnungsebene hineingerichtet ist, so wird die Energiewanderung im elektromagnetischen Felde nach der POYNTINGschen Regel durch folgende Überlegung bestimmt (vgl. EBERT, 304):

Bei dem Modelle (Fig. 17) wandert die mechanische Energie von rechts nach links; dort, wo sich der Antriebspunkt (Rolle 1) befindet, wird immer aufs Neue Arbeit geleistet und damit durch eine äussere, an der cyklischen Koordinate wirkende Kraft, etwa unsere Muskelkraft, dem System Energie zugeführt; sie wird nach links hin weitergegeben, an dem gebremsten Teile fortwährend in Wärme verwandelt und als solche den umgebenden Massen zugeführt. Kehren wir den Drehungssinn des Antriebsmechanismus um, so wechselt auch der Drehungssinn aller anderen Teile.

Im Sinne unseres elektromagnetischen Bildes heisst dies: die Richtung der magnetischen Kraftlinien geht jetzt von rückwärts durch die Zeichenebene nach vorn.

Gleichzeitig kehrt sich aber an allen Stellen auch die Richtung der Spannungen in den vermittelnden Elementen um; die Richtung der elektrischen Kraft, des Displacement, der dielektrischen Polarisation ist dann von oben nach unten gerichtet. Die Energie wandert nach wie vor von rechts nach links durch die Reihe der gekoppelten Elemente hindurch. Der Energiefluss ist also in völlig eindeutiger Weise mit den Richtungen des magnetischen und elektrischen Kraftvektors verbunden. Die folgende Regel gilt ganz allgemein.

Die Energie wandert immer in einer Richtung durch das elektromagnetische Feld, welche sowohl zur Richtung der magnetischen wie der elektrischen Kraft senkrecht steht. Und zwar ist der Sinn der Wanderung derselbe wie der der Vorwärtsbewegung einer gewöhnlichen Rechtsschraube (Korkzieher), wenn dieselbe in der Richtung von der elektrischen zur magnetischen Kraft herumgedreht wird.

Von rechts her gesehen, liegen die genannten beiden Vektoren bei dem in Fig. 17 gezeichneten Drehungssinne, wie es Fig. 19 zeigt; die Schraube dringt vorwärts, wenn sie

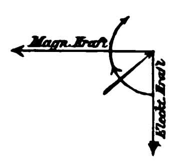


Fig. 19.

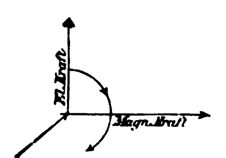


Fig. 20.

im Pfeilsinne gedreht wird, ebenso die Energie (Pfeil E in Fig. 17). Ist der Drehungssinn an Rolle 1 der umgekehrte, so liegen die Vektoren (von rechts gesehen), wie es Fig. 20 zeigt, die Wanderung der Energie erfolgt wieder gegen die Zeichnungsebene hin.

Die Quantität der in der Zeiteinheit übertragbaren Energie ist sowohl der elektrischen wie der magnetischen Kraft, in unserem mechanischen Beispiele der Drehgeschwindigkeit und der elastischen Spannung, also dem Produkte beider Grössen proportional. Diese Regel hat zuerst POYNTING als unmittelbare Folge der MAXWELLschen Theorie abgeleitet.

Handelt es sich um den Fall, dass kein homogenes magnetisches Feld vorliegt, also z. B. ein gerader Stromleiter von den das „Feld" bildenden Wirbelröhren konzentrisch umgeben wird, und soll die Abnahme des Feldes, d. h. der Wirbelintensität im Modell angedeutet werden, so hätte man bei letzterem nach EBERT (vgl. Fig. 21) folgende Abänderung zu treffen (wenn Fig. 21 wiederum als halbes Querschnittmodell zu denken ist, welches durch Rotation um den Stromleiter S die Wirbelröhren liefert): die mit allen Nachbarrollen, wie in Fig. 17 und 18 angedeutet, verbundenen Rollen (Wirbel-

röhrenquerschnitte) werden mit verschiedenem Durchmesser gewählt und zwar proportional mit der Entfernung vom Leiter zunehmend; alsdann nimmt die Winkelgeschwindigkeit und die durch sie dargestellte magnetische Kraft umgekehrt proportional mit der Entfernung ab.

77. Scheinbare Substanzen ersetzt durch Dauerbewegungen.

Es wurde schon früher erwähnt, dass das Charakteristische der neueren Anschauungen von MAXWELL an in der hervorragenden Rolle zu suchen ist, welche das Zwischenmedium bei allen elektromagnetischen Vorgängen spielt: die allen neueren Auffassungen gemeinschaftliche, zuerst von MAXWELL konsequent durchgeführte Wirbelvorstellung des Feldmediums gestattet die früheren Fernwirkungen durch die „verborgenen" cyklischen Bewegungen des Zwischenmediums mechanisch zu „erklären", d. h. auf die mechanischen Gesetze zurückzuführen. Eine weitere Ausbildung hat alsdann im Anschluss an die von W. THOMSON (Lord KELVIN) vielfach zu elektromagnetischen Modellen benutzten Kreiselbewegungen dazu geführt, die „scheinbaren Substanzen" der früheren Theorien mehr und mehr als „Dauerbewegungen"

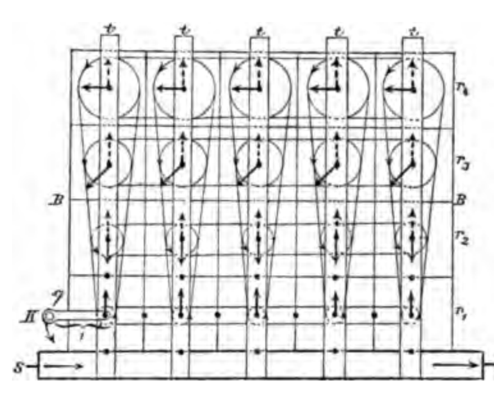


Fig. 21.

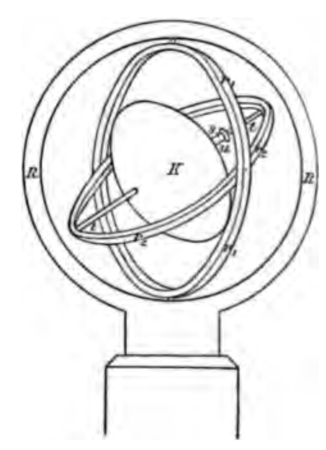


Fig. 22.

aufzufassen, eine nach MAXWELL, namentlich von HELMHOLTZ und HERTZ weitergeführte Entwickelung, die schliesslich zu den neuesten Auffassungen, wie der von EBERT, führte. Als Beispiel für die Benutzung der verborgenen Bewegungen, nach Art der KELVINschen Modelle, sei hier noch folgendes von EBERT (vgl. a. a. O., 210) angegebene mechanische Analogon des Induktionsvorganges angeführt:

Wir haben vorher ein mechanisches Bild der elektromagnetischen Wechselwirkung von Strom- und Magnetkraftfeldern entworfen, indem wir von der HELMHOLTZ-MAXWELLschen Anschauung ausgingen, dass längs der Kraftlinien gyroskopische, in sich zurücklaufende, wirbelartige oder cyklische Bewegungen vor sich gingen, die zwar an sich „verborgen" sind, aber doch mit ihrer Energie den Energieinhalt der genannten Felder ausmachen. Bei dem Versuche, die Induktionserscheinungen in weitere Begriffselemente aufzulösen und sozusagen in ihren „Mechanismus" tiefer einzudringen, werden wir in sehr bemerkenswerter Weise wiederum auf analoge Beziehungen bei mechanischen Systemen mit solchen in sich zurücklaufenden Kreiselbewegungen hingewiesen. Da wir oft auf diese nahe Beziehung zurückkommen werden, so möge schon hier ein solch einfaches mechanisches Beispiel zum Vergleiche herangezogen werden.

Kreisel in Kardanischer Aufhängung (Gyroskop).

Fig. 22. In dem feststehenden vertikalen Ringe R dreht sich um eine vertikale Achse der Ring r_1 und in diesem um eine horizontale der kleinere Ring r_2. In diesem

ist senkrecht zu seiner eigenen horizontalen Umdrehungsachse die Rotationsachse eines homogenen, abgeplatteten Umdrehungskörpers K gelagert, an dem die mit einem kurzen Stift s versehene Rolle u befestigt ist. Wird um u eine Schnur, die mit einer Schleife am Ende an s festgehängt ist, geschlungen so kann K durch Abziehen derselben in sehr schnelle Rotation versetzt werden.

Versuch: Durch das Aufziehen des Kreisels erhält man ein mechanisches System mit einer cyklischen Bewegung, von welcher man aber fast nichts direkt bemerkt: sie ist in hohem Grade eine „verborgene Bewegung".

Drücken wir den Ring r_1 an einer Seite voran, etwa so, dass der spitze Winkel zwischen ihm und dem feststehenden Ringe R vergrössert wird, so hebt sich der Ring r_2 mit der vorderen Hälfte. Wenn wir jetzt umgekehrt an dieser Hälfte den Ring r_2 erfassen und die hebende Bewegung unsererseits ausführen, so geht der Ring r_1 zurück, der vorher betrachtete Winkel zwischen ihm und dem Ringe R vermindert sich.

Jeder Änderung der einen Grösse entspricht eine „reziproke" der anderen; beide Erscheinungsgruppen stehen wie Spiegelbilder einander gegenüber.

Bei den Wirbelbewegungen spielen namentlich die Centrifugalgesetze für die Erklärungen der Felderscheinungen, in erster Linie der ponderomotorischen, eine wichtige Rolle. Jeder Körper wird bei der Rotation um eine bestimmte Achse infolge der Centrifugalkraft ein Vergrösserungsbestreben senkrecht zur Drehachse und bei gegebener Masse ein Verkleinerungsbestreben in Richtung der Achse erfahren (Phänomen der Erdabplattung); bei nicht völliger Starrheit des Rotationskörpers wird also ein seitlicher Druck senkrecht zur Rotationsachse ausgeübt. Dies gilt auch für die Wirbelfäden des magnetischen Feldes, so dass bei diesen allgemein das Gesetz gilt: „Verkürzungszug längs, Druckwirkung quer zu den Kraftlinien."

Die Übertragung der Feldenergie auf den Leiter hätte man sich nach Ebert (vgl. a. a. O., 328) etwa wie folgt vorzustellen:

Im freien Felde findet anscheinend kein Verlust statt, worauf wir schon hingewiesen. Dagegen erwärmt sich bei den zweifach zusammenhängenden Kraftfeldern erfahrungsgemäss der Feldträger, die Kraftachse. Wärme erscheint in den meisten Fällen entweder als Folge von chemischen (z. B. Verbrennungs-) Prozessen, oder sie entstammt einer gehemmten Bewegung und ist dann als Äquivalent einer bestimmten Menge verloren gegangener kinetischer Energie anzusehen. Da wir an unserem metallischen Stromträger keine chemischen Veränderungen wahrnehmen, so liegt die Vermutung am nächsten, dass im vorliegenden Falle die zweiterwähnte Quelle die Ursache der Erwärmung ist und die Cykelbewegungen zwar nicht im freien Felde, wohl aber am und im Stromträger selbst eine Art Reibung erfahren.

Wir können uns von den Folgeerscheinungen dieser Energietransformation das folgende mechanische Bild machen. Wenn die Feldbewegungen am und im Stromträger eine Reibung erfahren, d. h. wenn die Energie der innersten den Träger unmittelbar begleitenden Kraftröhren fortwährend zum Teil oder ganz in Wärmeenergie transformiert wird, verlieren sie mit ihrem Inhalte an kinetischer Energie die Fähigkeit, Querdrucke auszuüben und dem Drucke der umgebenden Röhren zu widerstehen; denn nach § 125 sind diese quer zu den Kraftlinien auftretenden Drucke eine Folge der Drehbewegungen im Felde. Die ferner liegenden Kraftlinienringe ziehen sich also zusammen und rücken näher an den Stromträger heran; schliesslich verschwinden sie ganz im Innern der Kraftachse. Damit findet auch ein fortwährendes Heranwandern und Nachdrängen der in ihnen enthaltenen Feldenergie statt, welche am und im Leiter in Wärme verwandelt wird.

Wir schliessen prinzipiell in diesem Buche Vorgänge aus, bei denen Stromarbeit ausser zu Erwärmungen noch zu anderen als mechanischen Leistungen, z. B. chemischen, aufgewendet wird, und denken uns daher die Strombahnen immer aus Medien zusammengesetzt, welche dadurch, dass sie zu Trägern des Stromphänomens gemacht werden, keinerlei chemische Veränderungen erfahren, aus sogenannten Leitern erster Klasse, also vornehmlich aus Metallen. Dann haben wir hier einen von den in der Natur überaus häufigen Fällen der Umwandlung der Energie „geordneter Bewegung" (der Cykelbewegung) in Wärmebewegung (Energie „ungeordneter" Bewegung) vor uns. Der Draht ist das Führende für diesen Transformationsprozess. Man hat Grund, die Wärme im Vergleich

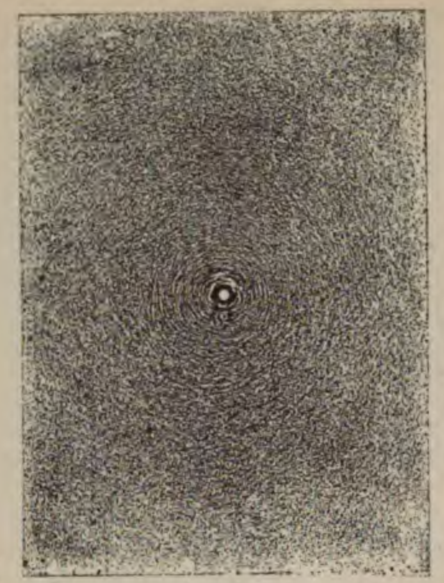


Fig. 23.

mit anderen als eine minderwertige Energieform (beschränkte Verwandelbarkeit) anzusehen und kann daher auch sagen: Am Stromleiter tritt fortwährend eine „Degradierung", eine „Verwüstung von Feldenergie" ein.

Was einem Körper im wesentlichen die Eigenschaft eines Leiters giebt, ist die Fähigkeit, Energie des elektromagnetischen Feldes in die minderwertige Form der Wärme herabzutransformieren, wodurch das Nachdrängen neuer Energiequanta bedingt ist, so dass ein fortwährendes Heran-„Leiten von Energie" veranlasst wird. Nach dieser Auffassung ist bei einem Kabel die „isolierende" Guttaperchahülle das „Leitende"; die Kupferseele besorgt durch fortwährendes Heruntertransformieren nur die Führung der Energie, sie hält dieselbe zusammen, ja leitet durch die genannte Transformation überhaupt erst die Energiewanderung, d. h. die Strombildung ein.

78. Antriebswirkung bei elektromagnetischen Mechanismen.

Diese von den Wirbelfäden des magnetischen Feldes ausgeübten Querdrucke können auch in sehr vorteilhafter Weise zur Erklärung der ponderomotorischen Wirkungen benutzt werden, wenn man berücksichtigt, dass der Querdruck um so stärker ist, je stärker das Feld, d. h. je grösser die Wirbelintensität, oder je dichter nach der üblichen Darstellung die Kraftlinien sind. Es sei dies an dem einen, für die Elektrotechnik wichtigsten Fall gezeigt, wo der Antrieb ermittelt werden soll, den ein stromdurchflossener Leiter in einem Magnetfelde erfährt:

Es stellt Fig. 23 das mit Eisenfeile gewonnene Kraftlinienbild, sowie Fig. 24 die übliche schematische Darstellung eines die Papierebene senkrecht durchsetzenden stromdurchflossenen Leiters vor, z. B. eines Ankerdrahtes. Liegt dieses konzentrische Kraftfeld des Leiters ausserhalb eines anderen Magnetfeldes — im späteren als Hauptfeld gegenüber jenem Eigenfelde des

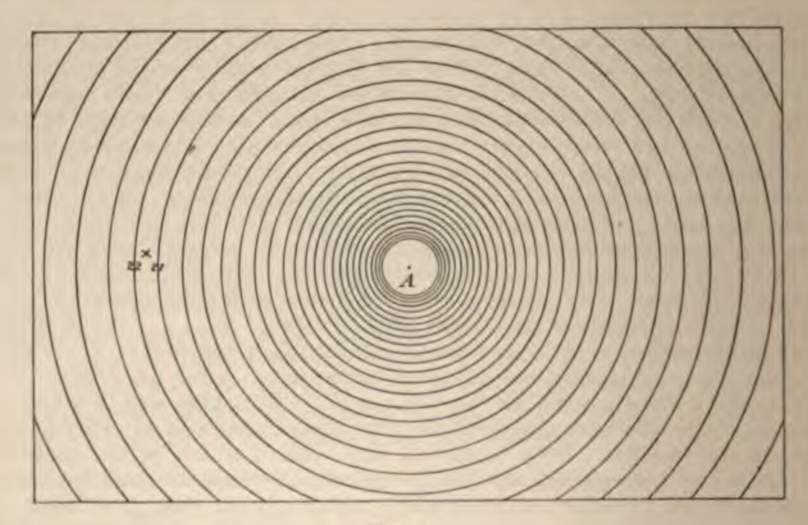


Fig. 24.

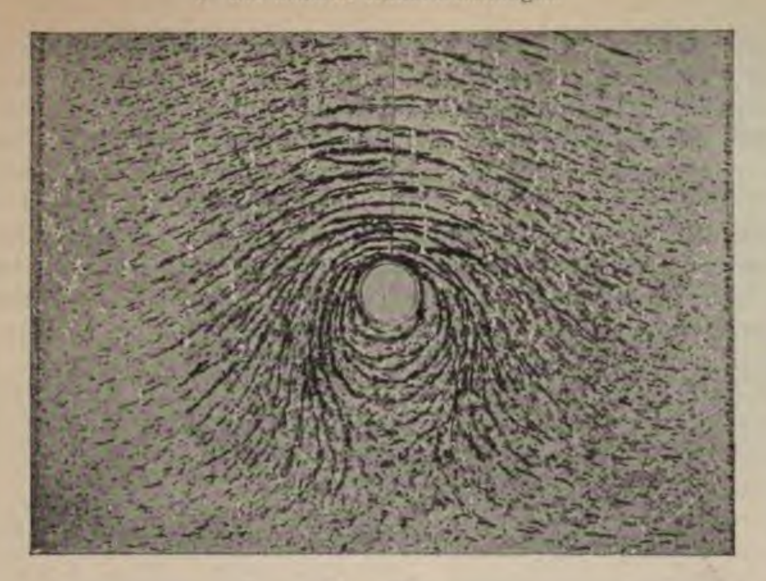


Fig. 25.

Leiters bezeichnet — so wird zwar von allen Seiten von dem anstossenden Wirbelring ein Querdruck auf den Leiter ausgeübt (vgl. 77), jedoch kann dieser Querdruck wegen allseitiger Gleichheit keine Bewegung des Leiters veranlassen. Denkt man sich jedoch jetzt diesen selben stromdurchflossenen Leiter mit Eigenfeld in ein zweites, stärkeres und der Einfachheit halber als homogen angenommenes Feld (Hauptfeld) mit für sich parallel und gradlinig verlaufenden Kraftlinien (Wirbelfäden) verbracht, so muss das kreisförmige Eigenfeld des Leiters auf der einen Hälfte das Hauptfeld verstärken, auf der anderen Hälfte schwächen, da die Wirbelintensitäten und damit auch die Feldstärken sich nach Art der Kräfte überlagern. Die beiden teilweise kontrastierenden Felder werden also ein resultierendes Feld ergeben, dessen Kraftlinienbild mit Eisenfeile in Fig. 25 und dessen zugehörige schematische Kraftliniendarstellung in Fig. 26 wiedergegeben ist. Beachtet man nun als allgemein giltiges Gesetz, dass die auf den Leiter ausgeübten Querdrucke proportional der resultierenden magnetischen Wirbelintensität oder Feldstärke (Kraftliniendichte in der schematischen Darstellung) erfolgen, so ist ohne weiteres einleuchtend, dass die resultierenden Querdrucke des Feldes eine resultierende Antriebskraft (ponderomotorische Kraft) auf den Leiter in Richtung des schwächeren bezw. geschwächten Feldes, d. h. hier nach unten (Pfeilrichtung) ausüben müssen. Steht dieser ponderomotorischen Kraft nun eine kleinere mechanische Wiederstandskraft gegenüber (Motor), so muss offenbar die Bewegung in Richtung dieses elektromagnetischen Antriebes erfolgen. Im anderen Fall (Generator) muss unbedingt der von aussen auf den stromdurchflossenen Leiter übertragene mechanische Druck (das zugeführte Drehmoment) grösser sein als jener Antrieb. Zu weiterer Benutzung dieser mechanischen Hülfsvorstellungen wird sich in dem



Fig. 26.

Hauptteil dieses Bandes bei Darstellung der elektromagnetischen Erscheinungen im einzelnen wiederholt Gelegenheit geben, da auch für die Darstellung solche Hülfsvorstellungen einen ökonomischen Wert besitzen, insofern sie oft rascher als andere Beschreibungen die beim Leser gewünschte Gedankenrichtung auszulösen und denselben auf den zu übermittelnden Punkt hinzuweisen vermögen.

Bezüglich der Verschiedenheiten, welche zwischen den älteren MAXWELLschen mechanischen Hülfsvorstellungen und den neueren, z. B. den obigen von EBERT, bestehen, möchte der Verfasser bemerken, dass nach seiner Ansicht die Beseitigung der Substratvorstellung (Friktionsteilchen) vom rein wissenschaftlichen Standpunkt aus wohl einen Fortschritt bedeutet, dennoch hält er es für die spätere Benutzung von mechanischen Hülfsvorstellungen doch aus rein praktischen Gründen für empfehlenswerter, zunächst noch die grobsinnlichere Darstellung der früheren MAXWELL schen Hülfsvorstellungen zu benutzen, und zwar aus folgenden Gründen:

Erstens haben die neueren Vorstellungen durch die Beseitigung der Substratvorstellungen an wissenschaftlichem Wert und Eleganz zwar gewonnen, an unmittelbarer Anschaulichkeit und Greifbarkeit gegenüber den älteren, MAXWELLschen in verschiedener Hinsicht aber verloren, und für den Elektrotechniker dürfte der letztere Punkt zunächst praktisch von grösserem Gewicht sein.

Zweitens würde eine konsequente Verwendung der neuesten Vorstellungen bei der grösseren Zahl der noch im Banne der älteren Fluidums- und Fernwirkungstheorien ausgebildeten Elektroingenieure dieser Generation wahrscheinlich häufig Verwirrung stiften wegen der teilweise geradezu gegensätzlichen Auffassung zwischen jenen beiden Extremen, während ihnen der Übergang zu den vermittelnden älteren MAXWELL-Vorstellungen viel leichter fallen dürfte.

Drittens endlich wird derjenige, der sich von der älteren Auffassung zunächst in die grobsinnlichen MAXWELLschen Vorstellungen hineingedacht hat, keine erheblichen Schwierigkeiten finden — entsprechend der thatsächlich erfolgten Entwickelung — sich weiter in die neuesten eleganten Auffassungen hinüber zu entwickeln, d. h. falls erwünscht, jene in diese umzudenken, was beim unmittelbaren Übergang[1]) von der alten zur neuesten Auffassung vielfach dem praktischen Ingenieur zu grosse Schwierigkeiten machen dürfte, um ihn zu diesem durchgreifenden Schritt auf einmal veranlassen zu können.

In letzter Linie möge auch darauf hingewiesen sein, dass im Gegensatz zu der reinen Bewegungs-Auffassung der elektromagnetischen Erscheinungen gerade die neuesten Forschungen der Elektrophysik in weiterer Verfolgung der von der neueren Elektrochemie — namentlich ARRHENIUS, OSTWALD, NERNST u. a. — ausgebildeten Jonen-Hypothese wieder zu ausgesprochen materiellen Vorstellungen geführt haben, welche in vieler Hinsicht an die MAXWELLschen Vorstellungen der Friktionsteilchen erinnern, ja dieselben an Materialität zuweilen bedenklich zu überbieten erscheinen. Es sind dies die Ergebnisse auf dem gegenwärtig im Vordergrund des Interesses stehenden

1) Der Übergang von der reinen Vorstellung der unmittelbaren Fernwirkung zu der reinen Vorstellung der vermittelten Fernwirkung lässt nach H. HERTZ (siehe dessen G. W. II, S. 24—29) vier Standpunkte oder Stufen erkennen, deren Charakterisierung a. a. O. in vortrefflicher Weise erfolgt ist.

Gebiete der „Gasentladungen“ nebst den verschiedenen hierbei unterschiedenen Strahlungsarten elektromagnetischer Natur, wie Kathodenstrahlen, Kanalstrahlen, Becquerelstrahlen (Strahlen radioaktiver Substanzen), welche vielfach die Forscher zu Vorstellungen der früher geschmähten Emissionstheorie zurückgeführt haben.

79. Elektronen-Vorstellung.

Die Übertragung der Jonenvorstellung (vgl. **37**) bei allen elektrolytischen Vorgängen in Flüssigkeiten auf die Gasentladungsvorgänge hat sich einerseits als sehr fruchtbar erwiesen, hat aber andererseits mit Notwendigkeit auf die Wiederaufnahme rein materieller Hülfsvorstellungen für die Vorgänge bei der Elektrizitätsleitung geführt. Die Bestimmungen des Verhältnisses $\frac{m}{\varepsilon}$ d. h. der Masse m in Gramm, welche gleichzeitig mit der Elektrizitätmenge ε in Coulomb bei der Jonenleitung abgeführt (transportiert) wird, haben zwei sehr überraschende Resultate geliefert: einmal, dass die Fortführung der negativ elektrischen Masse bei Kathodenstrahlen mit ungeahnt grosser Geschwindigkeit erfolgt, welche sich in stark verdünnten Gasräumen der Lichtgeschwindigkeit nähert, ein zweites Mal, dass die bisherigen Atomvorstellungen, d. h. die Vorstellungen über die kleinsten selbständig bestehenden Mengen von Materie im wahren Sinne des Wortes in die Brüche geraten sind, indem jenes Verhältnis $\frac{m}{\varepsilon}$ bei Entladungsvorgängen von der negativen Elektrode aus (Kathodenstrahlung) zu Masseneinheiten von der Grössenordnung 10^{-7} (Gramm pro Coulomb) geführt hat. Da diese Masseneinheiten etwa 1000mal kleiner sind als ein Wasserstoffatom, die bisher als die kleinste angesehene Sondermasse, wie sie aus den elektrolytischen Vorgängen sich bei 96500 Coulomb oder 9650 C.-G.-S. Einheiten des E. M. M. auf 1 Gramm-Äquivalent ergiebt, so erfolgte für die Gasentladungen notgedrungen die Schaffung neuer elementarer Masseneinheiten in Gestalt der Uratome, Korpusküle, Elektrons, Mikrojone u. s. f.

In den letzten Jahren hat namentlich die Elektronen-Theorie eine weitere Ausbildung erfahren, welche die elektrischen Grundvorstellungen ihrer Verfechter stark beeinflusst hat und wegen ihrer Perspektiven auch allgemeineres Interesse beanspruchen kann. Zur Kennzeichnung der letzteren, sowie überhaupt zum besseren Verständnis der Entwickelung des Elektronenbegriffes mögen hier von den beiden Göttinger Hauptvertretern einige Ausführungen auf der letzten Naturforscherversammlung in Hamburg im Wortlaut folgen (vgl. W. NERNST: Über die Bedeutung elektrischer Methoden und Theorien für die Chemie 1901 Ph. Z. III, 68; sowie W. KAUFMANN: Die Entwickelung des Elektronenbegriffs 1901 Ph. Z. III, 10 und ff.):

Erinnern wir uns, dass vor etwa einem Jahrhundert die Entdeckung jenes chemischen Grundgesetzes (der konstanten und multiplen Proportionen) Anlass zur Einführung der Atomistik in die exakte Naturwissenschaft gab und dass bis auf den heutigen Tag dieses Gesetz die sicherste experimentelle Unterlage jeder molekulartheoretischen Betrachtung geblieben ist. Ohne die atomistische Naturauffassung ständen wir diesem fundamentalen Naturgesetze völlig ratlos gegenüber, während es uns vom Standpunkte der Atomistik geradezu selbstverständlich erscheint.

Genau so liegt die Sache offenbar, wenn es sich um die Auffassung des obigen elektrochemischen Grundgesetzes handelt: denken wir uns die elektrischen Fluida als kontinuierlich, so bleibt es völlig unerklärlich, warum die verschiedensten Elemente und Radikale immer gerade eine ganz bestimmte Elektrizitätsmenge bilden oder gerade eine Multiplum davon. Sofort aber wird es zur notwendigen Konsequenz, wenn wir die Elektrizität als in einzelne Atome von unveränderlicher Grösse uns geteilt denken.

Hierdurch gelangen wir also sozusagen zu einer chemischen Theorie der Elektrizität, die wir zum Schluss noch kurz betrachten wollen.

Ausser den bekannten chemischen Elementen hätten wir zwei neue anzunehmen, gebildet von den positiven und negativen Elektronen, wie man diese elektrischen Atome bezeichnet; diese Elemente sind chemisch einwertig, d. h. die Valenz eines einwertigen Elementes kann durch ein, die eines zweiwertigen Elementes durch zwei Elektronen gesättigt werden u. s. w. Das Atomgewicht dieser Elektronen kann für die Zwecke der Chemie als verschwindend klein angesehen werden. Forschungen auf ganz anderen Gebieten, die in erster Linie das Studium der Kathodenstrahlen betrafen, und worüber Herr Dr. KAUFMANN, ein sehr erfolgreicher Bearbeiter dieses Gebietes, am letzten Mittwoch von dieser Stelle aus berichtet hat, haben es übrigens wahrscheinlich gemacht, dass das Atomgewicht der negativen etwa $^1/_{2000}$ des Atomgewichtes des Wasserstoffes ist. Freilich ist die Frage noch offen, ob es sich hier um eine wirkliche Masse im gewöhnlichen Sinne handelt. Jedenfalls aber ist diese Grösse in der That bei chemischen Arbeiten verschwindend, insofern als etwaige durch die negativen Elektronen bedingte Gewichtsveränderungen innerhalb der unvermeidlichen Fehler auch der genauesten bisherigen chemischen Analysen liegen.

Ob die positiven Elektronen, wie nicht unwahrscheinlich, das gleiche Atomgewicht haben, wissen wir nicht, weil man an diesen die den Kathodenstrahlen entsprechende Erscheinung noch nicht aufgefunden hat. Die Eigentümlichkeiten, welche diesen beiden Elementen zwischen allen anderen eine ganz entschiedene Ausnahmestelle verleiht, sind die von ihnen ausgehenden eigenartigen Kraftwirkungen, die von der NEWTONschen Attraktion der gewöhnlichen Elemente und Verbindungen so vollkommen verschieden sind. Die Behandlung dieser Kräfte bildet eben den physikalischen Teil der Elektrizitätslehre, die seit COULOMB und AMPÈRE mit der Erforschung der Gesetze jener Kräfte sich beschäftigt hat.

Die Jonen sind, wie schon bemerkt, als chemische Verbindungen zwischen gewöhnlichen Atomen und Radikalen und den Elektronen aufzufassen, und zwar sind es gesättigte chemische Verbindungen.

Wenn wir nämlich etwa im Chlornatrium das Natriumatom durch ein negatives Elektron substituieren, so bekommen wir das negative Chlorion; wenn wir das Chloratom durch das positiv geladene Elektron ersetzen, so bekommen wir das positive Natriumion. Man sieht also, dass die Jonen sich vollständig in das Schema der Substitutionstheorie einordnen, sobald wir die atomistische Auffassung der Elektrizität zu Hülfe nehmen. Gleichzeitig wird auch der gewaltige Unterschied zwischen freiem Chlor und dem Chlorion, zwischen freiem Natrium und dem Natriumion offenbar; denn genau so, wie das physikalische Verhalten des freien Chlors und des freien Natriums ganz anders ist, als wenn diese Elemente in einer chemischen Verbindung, wie etwa Chlornatrium, vorhanden sind, so wird ihr Verhalten durchgreifend durch die Verbindung mit den elektrischen Elementaratomen, das heisst durch den Übergang in den Jonenzustand, geändert.

An diese Ausführungen von W. NERNST mögen sich sogleich einige charakteristische Stellen aus dem obenerwähnten Vortrag von W. KAUFMANN anschliessen:

In einer zum Gedächtnis M. FARADAYS im Jahre 1881 gehaltenen Rede weist H. v. HELMHOLTZ darauf hin, dass wir aus dem FARADAYschen Gesetz mit Notwendigkeit auf die Existenz elektrischer Atome schliessen müssen. Da nämlich die geladen chemischen Atome, von FARADAY als Jonen — d. h. die Wandernden — bezeichnet, an den Elektroden als neutrale Körper ausgeschieden werden, so muss dort eine Abgabe der Ladungen oder ein teilweiser Austausch gegen Ladungen entgegengesetzten Vorzeichens stattfinden.

Während dieses Vorganges, der ja nicht momentan stattfinden kann, müssen also die Ladungen wenigstens für eine kurze Zeit, eine selbständige Existenz führen können; was liegt näher, als diese stets gleiche Ladungseinheit einer Valenz als ein Elementarquantum der Elektrizität, als ein elektrisches Atom zu betrachten. Und wenn ein neutrales Molekül etwa $NaCl$ (Chlornatrium) beim Auflösen in Wasser in + geladenes Na und — geladenes Cl zerfällt, so ist das Wahrscheinlichste, dass das Na- und das Cl-Atom jedes seine Ladung schon vorher hatte, und dass diese Ladungen nach aussen bloss deshalb unbemerkbar blieben, weil + und — Ladung gleich gross waren. Denkt man sich nun aber einen Lichtstrahl einen $NaCl$-Krystall durchsetzend, so müssen die Ladungen

respektive die mit ihnen verbundenen Atome in Schwingungen geraten und die Lichtbewegungen beeinflussen. Die elektrolytischen Valenzladungen sind es also, die wir als die in den durchsichtigen Körpern mitschwingenden elektrischen Teilchen zu betrachten haben, und deren Anziehungskräfte, wie HELMHOLTZ nachwies, jedenfalls auch den weitaus grössten Teil der chemischen Verwandtschaftskräfte ausmachen.

Der Weg zur Berechnung der im Elektron enthaltenen Elektrizitätsmenge ist ein sehr einfacher. Die zur elektrolytischen Ausscheidung von 1 ccm irgend eines einatomigen Gases nötige Elektrizitätsmenge wird dividiert durch die LOSCHMIDTsche Zahl, d. h. die Zahl der in 1 ccm enthaltenen Gasmoleküle. Bei der Unsicherheit dieser letzteren Zahl kann man nur sagen, dass ein Elektron etwa 10^{-10} (1 : 10 Milliarden) elektrostatische Einheiten enthält.

Das ZEEMANNsche Phänomen (vgl. H. 1, 3, § 49) erlaubte es ferner, die mit den schwingenden Ladungen verbundene träge Masse zu bestimmen; und da ergab sich ein Resultat, das ein wenig frappant ist: das schwingende Elektron ist stets negativ geladen, während das positive festliegt; das Verhältnis von Ladung zu Masse beträgt 17 Millionen EME (Elektromagnetische Einheiten) pro Gramm; da nun ein Gramm Wasserstoff, d. h. eine Grammvalenz nur 9650 EME enthält, so folgt daraus, dass die mit dem schwingenden Elektron verbundene Masse nur etwa den zweitausendsten Teil eines Wasserstoffatoms beträgt. Die anfänglich meist stillschweigend eingeführte Annahme, dass das ganze Jon, das heisst chemisches Atom plus Valenzladung schwinge, muss also fallen gelassen werden; wir müssen vermuten, dass die Ladung, ebenso wie bei der elektrolytischen Ausscheidung an den Elektroden einer Zersetzungszelle, so auch im lichtemittierenden Molekül eine selbständige Beweglichkeit hat, und dass die beim ZEEMANN-Phänomen in Betracht kommende Masse eben die des Elektrons selbst ist.

Die elektrischen Entladungen in Gasen hatte man schon lange versucht, als einen der Elektrolyse verwandten Prozess zu betrachten. W. GIESE ist es, der zuerst dieser Hypothese durch Untersuchung der Leitung in Flammengasen eine gewichtige Stütze verlieh und auch versuchte, die Leitung in Metallen durch Wanderungen von Jonen zu erklären.

Vor allem waren es aber die sogenannten Kathodenstrahlen, denen man, zum Teil infolge der zu Ende 1895 erfolgten Entdeckung der Röntgenstrahlen, jetzt wieder die grösste Aufmerksamkeit zuwandte.

Das Verhalten dieser Strahlen im Magnetfelde, ihre Wärmewirkungen, ihre vermeintlichen mechanischen Wirkungen versuchte CROOKES (vgl. **37**) durch die Annahme zu erklären, diese Strahlen beständen aus Gasmolekülen, die an der Kathode negativ geladen, von dieser wie beim elektrischen Kugeltanz abgestossen und in den Röhrenraum hineingeschleudert wurden. Es liessen sich auch thatsächlich die meisten beobachteten Erscheinungen durch die Hypothese ganz leidlich deuten.

Genauere Untersuchungen, namentlich zahlenmässige Prüfungen erwiesen jedoch sehr bald die Unhaltbarkeit der CROOKESschen Hypothese, wenigstens in ihrer ursprünglichen Form. Leider hat man dabei, namentlich in Deutschland, das Kind mit dem Bade ausgeschüttet; man hat die ganze Hypothese verworfen, weil die ganz spezielle Vorstellung, dass es sich um durch Kontakt geladene Moleküle handele, sich als falsch erwies.

Man braucht die Kathodenstrahlen bloss als geladene Massenteilchen zu betrachten, die viel kleiner sind als die gewöhnlichen Atome. Eine ganze Reihe von messbaren Eigenschaften der Kathodenstrahlen ermöglicht es zu bestimmen, wie gross bei diesen Teilchen die Ladung pro Grammmasse ist.

Das Resultat war zwar bei verschiedenen Beobachtern etwas verschieden, es schwankt zwischen 7 und 19 Millionen EME pro Gramm; jedenfalls aber liegen diese Zahlen den beim ZEEMANN-Effekt gefundenen so nahe, dass man unbedingt der zuerst wohl von E. WIECHERT (1898) ausgesprochenen Hypothese beistimmen kann, dass wir es in beiden Fällen mit denselben Teilchen, nämlich den Elektronen, zu thun haben. Wir haben also in den Kathodenstrahlen die Elektronen, die in den optischen Erscheinungen ein ziemlich verborgenes Dasein führen, sozusagen leibhaftig vor uns.

In einfacher Weise liessen sich jetzt eine Reihe von Folgeerscheinungen erklären. Ein solches mit ungeheuerer Geschwindigkeit, nach direkten Messungen WIECHERTs je nach der angewandten Kraft mit $^1/_5$ bis $^1/_8$ der Lichtgeschwindigkeit, fliegendes Elektron, muss, wenn es auf einen festen Körper aufprallt, notwendig eine explosionsartige elektrische Welle in den Raum hinaussenden, genau wie ein aufschlagendes Projektil eine Schallwelle; wir haben triftige Gründe zu der Annahme, dass die Röntgenstrahlen solche

Wellen seien. Weiter: wenn die Elektronen aus der Oberfläche der Kathode herausfliegen, so müssen sie auch schon in ihrem Innern sich an die Oberfläche heranbewegt haben; d. h. die elektrische Leitung im Metalle besteht wohl auch in einer Wanderung von Elektronen. Während also im flüssigen Elektrolyten das Elektron stets an ein materielles Atom gebunden als „Jon" erscheint, haben wir es im Metall mit frei wandernden Elektronen zu thun.

Überall also, in sämtlichen Aggregatzuständen, spielen die Elektronen bei den elektrischen und optischen Vorgängen ihre wichtige Rolle; sie sind die kleinsten bisher bekannten Bestandteile unserer sichtbaren Welt; ihr Auftreten auch bei Abwesenheit äusserer elektrischer oder optischer Einwirkungen, d. h. der direkte Nachweis ihrer ständigen Existenz, würde gleichsam den Schlussstein in dem logischen Gebäude bilden, dessen Entstehung ich versucht habe, vor Ihnen aufzuführen; auch nach diesem Schlusssteine brauchen wir nicht lange zu suchen.

Wir haben in den Radiumsalzen eine Körperklasse, die imstande ist, von selbst, ohne jede äussere Einwirkung, Elektronen auszuschleudern. Wir stehen bezüglich der Energiequelle, sowie des ganzen Mechanismus dieser Erscheinung noch vor einem völligen Rätsel, zumal es sich hier um Geschwindigkeiten zu handeln scheint, die fast gleich der Lichtgeschwindigkeit sind, Geschwindigkeiten, die wir durch elektrische Kräfte, d. h. bei wirklichen Kathodenstrahlen sicher nur nach Überwindung der enormsten Schwierigkeiten erreichen können.

Gerade das Verhalten der Elektronen bei solch ungeheueren Geschwindigkeiten scheint aber geeignet, über die tiefgehendsten Fragen nach der Konstitution der Elektronen Aufschluss zu geben. Vor allen Dingen lässt sich durch direkte Messung entscheiden, ob die Masse der Elektronen vielleicht nur „scheinbar" durch elektrodynamische Wirkungen vorgetäuscht ist. Die bislang angestellten Versuche sprechen thatsächlich für die Annahme einer „scheinbaren" Masse.

Und hiermit kommen wir zu einer Frage, die tief hineingreift in den Bau der Materie überhaupt:

Wenn ein elektrisches Atom bloss vermöge seiner elektrodynamischen Eigenschaften sich genau so verhält, wie ein träges Massenteilchen, ist es dann nicht möglich, überhaupt alle Massen als nur scheinbare zu betrachten? Können wir nicht statt all der unfruchtbar gebliebenen Versuche, die elektrischen Erscheinungen mechanisch zu erklären, nun umgekehrt versuchen, die Mechanik auf elektrische Vorgänge zurückzuführen? Wir kommen hier wieder auf Anschauungen zurück, die schon von Zöllner vor 30 Jahren kultiviert wurden und neuerdings von H. A. Lorentz, J. J. Thomson und W. Wien wieder aufgenommen und verbessert worden sind: Wenn alle materiellen Atome aus einem Konglomerat von Elektronen bestehen, dann ergiebt sich ihre Trägheit ganz von selbst.

Zur Erklärung der Gravitation muss noch angenommen werden, dass die Anziehung zwischen ungleichartigen Ladungen etwas grösser sei als die Abstossung zwischen gleichartigen.

Ein Experimentum crucis für diese Anschauung wäre der Nachweis einer zeitlichen Fortpflanzung der Gravitation respektive ihrer Abhängigkeit nicht bloss von der Lage, sondern auch von der Geschwindigkeit der gravitierenden Körper.

Die Elektronen wären dann also die von so manchem gesuchten „Uratome", durch deren verschiedenartige Gruppierung die chemischen Elemente gebildet werden; der alte Alchimistentraum von der Umwandlung der Elemente wäre dann der Wirklichkeit bedeutend näher gerückt. Man könnte etwa annehmen, dass unter den unzähligen möglichen Gruppierungen der Elektronen nur eine relativ beschränkte Anzahl genügend stabil ist, um in grösseren Mengen vorzukommen; diese stabilen Gruppierungen wären dann die uns bekannten chemischen Elemente. Durch eine mathematische Behandlung dieser Fragen wird es vielleicht einmal gelingen, die relative Häufigkeit der Elemente als Funktion ihres Atomgewichtes darzustellen und vielleicht auch noch manches andere Rätsel des periodischen Systems der Elemente zu lösen.

Werfen wir noch einen Blick von der Erde in den Weltraum hinaus, so sehen wir auch dort so manche Erscheinung, auf die man nicht ohne Aussicht auf Erfolg versucht hat, die Elektronentheorie anzuwenden; die Sonnenkorona, die Kometenschweife und die Nordlichter gehören hierher.

Mag auch noch manches hierbei etwas zu hypothetisch erscheinen, soviel dürfte wohl aus dem Gesagten klar hervorgehen, dass die Elektronen, diese winzigen Teilchen, deren Grösse sich zu der eines Bazillus etwa verhält, wie diejenige eines Bazillus zur gesamten Erdkugel, und deren Eigenschaften wir doch mit grösster Präzision zu messen vermögen, dass diese Elektronen eine der wichtigsten Grundlagen unseres gesamten Weltgebäudes bilden.

Wie man sieht, sind hier die aus der Elektronenvorstellung sich ergebenden Perspektiven von ungeheurer Ausdehnung und würden, falls die Entwickelung nach der hier bezeichneten Richtung vor sich ginge, eine völlige Umwälzung nicht nur der Elektrophysik, sondern in noch höherem Grade der Grundlagen unserer gesamten Physik, namentlich aber der Mechanik einschliessen, indem sie gleichsam eine „Elektrisierung" der Mechanik, d. h. eine elektrische Auffassung des mechanischen Begriffes der Masse u. s. w. herbeiführen. Aber auch ohne Rücksicht auf die etwaige zukünftige Zurückführung weiterer, oder auch aller Gebiete der Physik auf elektrische Phänomene, wie es bereits bei der Optik der Fall war, bietet die Elektronenvorstellung wichtige Anregungen und Hülfsmittel für die gegenwärtige Entwickelung der Elektrophysik genug, um ihr die Aufmerksamkeit zuzuwenden.

Neben dieser Elektronenvorstellung, welche wir als die radikalste, um nicht zu sagen am ausgesprochensten revolutionäre Anschauungsrichtung betrachten können, haben die Forschungsergebnisse auf dem Gebiete der Gasentladungen noch verschiedene Varianten gezeitigt, welche gleichsam verschiedene Grade der Materialität der elektrischen Phänomene darstellen.

Auch darf nicht unerwähnt bleiben, dass es weder an Physikern noch Chemikern fehlt, welche von der ganzen Jonen- und Elektronenauffassung nichts wissen wollen und sie als eine Art reaktionäre Modethorheit betrachten. So sagt z. B. JAUMANN (vgl. Vorlesungen über Elektrizität und Licht, 1902 bei A. BARTH, 369) über die Kathoden- und BECQUEREL-Strahlen:

Sie sind zweifellos elektromagnetische Strahlen und zwar longitudinale elektrische Strahlen, welche an ihrem äusseren Umfange von ringförmigen, magnetischen Wechselströmungen begleitet werden. Hieraus lässt sich auch der Umstand erklären, dass sie nur von der Kathode (nur in der Richtung der elektrischen Strömung) verlaufen und durch elektrostatische Wirkungen abgelenkt werden können.

Sieht man jedoch von dieser gegenwärtig immerhin vereinzelten Stellungnahme gegenüber der modernen Jonenforschung ab, so können wir das Facit aus jenen verschiedenen Varianten der materielleren Auffassung kurz in folgender Schlussbetrachtung ziehen:

Die Bestätigung des Vorhandenseins eines Verhältnisses $\frac{m}{\varepsilon}$ von der Grössenordnung 10^{-7} bei den Gasentladungsvorgängen, welche sich aus den Untersuchungen nach verschiedenen Richtungen und bei völlig von einander unabhängigen Versuchsbedingungen ergab, eröffnete den Vorstellungen und Hypothesen bezüglich der elektrischen Leitungsvorgänge eine weite Bahn. Während die einen in jenen kleinsten Teilchen die Elektrizität selbst erblicken wollen (vgl. oben) und ihr sonach sowohl Masse als auch das Vermögen des thatsächlichen Strömens im Leiter wie bei einem Wasserstrom oder besser bei den MAXWELLschen Friktionsteilchen zusprechen, wollen die anderen bei diesen kleinsten Massentransporten die materielle Seite in Gestalt von Mikrojonen oder dergleichen unterschieden wissen von der elektrischen (Valenz-) Ladung. Die letztere Vorstellung hat dann zur Wiederaufnahme der Vor-

stellung von zwei Elektrizitäten geführt, welche wiederum von einigen als Überschuss und Manko an „Äther“ gedeutet worden ist, während andere den Unterschied durch freie Beweglichkeit der negativen und minder freie der positiven erklären wollen und in den Leitern die negative Elektrizität wirklich strömend, die positive aber an den Atomen haftend sich vorstellen (vgl. oben). Vielfach muten diese Vorstellungen wie ein bedenklicher Rückfall in alte, scheinbar längst überwundene Theorien an; jedenfalls bedürfen sie noch sehr der Klärung und unter Berücksichtigung des heutigen Standes der Erkenntnistheorie kann man denselben noch keine endgültige wissenschaftliche Bedeutung zusprechen, sondern dieselben nur als Arbeitshypothesen zulassen, d. h. Vorstellungen, welche geeignet sind, dem Forscher auf physikalischem Gebiet Anregungen zu weiteren experimentellen Fragestellungen zu gewähren.

Gleichzeitig zeigen dieselben aber auch, dass durch die reinen Bewegungsvorstellungen von Helmholtz-Hertz dem Vorstellungsbedarf auch der wissenschaftlichsten Physiker vorläufig noch nicht ausreichend Genüge geleistet ist, dass vielmehr die Verwendung von Hülfsvorstellungen von teilweise materieller Natur, wie diejenigen von Maxwell, gerade für praktische Bedürfnisse auch heute noch als ein notwendiges und durchaus nicht unwissenschaftliches Hülfsmittel angesehen werden muss.

Die elektromagnetischen Erscheinungen.

Dritter Abschnitt.

Die Erzeugung des elektrischen Spannungszustandes und die dielektrischen Erscheinungen.

A. Die Ursachen der Spannungserregung.

80. Spannungserzeugung durch mechanische Reibung.

Es kann als sicher gelten, dass der dielektrische Spannungszustand als das Wesentliche des sogenannten elektrischen Zustandes von Körpern anzusehen ist und dass das Dielektrikum der Sitz der elektrischen Spannungsenergieform ist. Es ist ferner als feststehend anzusehen, dass die verschiedenen elektrischen Spannungszustände im Dielektrikum sich nur in ihrer Grösse nicht aber in ihrem Wesen unterscheiden. Die Ursachen, welche die Erzeugung einer elektrischen Spannung bedingen, d. h. die Überführung eines bestimmten Energiebetrages einer nichtelektrischen Energieform in diejenige der elektrischen Spannungsenergie ermöglichen, sind ziemlich zahlreich, wenn sie sich auch in letzter Linie auf die Zahl der übrigen Energieformen zurückführen lassen und bei der Einheitlichkeit der Spannung schliesslich alle in der mechanischen Hülfsvorstellung als mechanische Druck- bezw. Zugkraft darstellbar sind.

I. Die Reibungselektrizität.

Unter den verschiedenen Ursachen, welche in einem Dielektrikum einen Spannungszustand hervorrufen können, ist die mechanische Reibung zwischen Körpern in Verbindung mit darauf folgender Entfernung, richtiger Trennung derselben durch ein Dielektrikum, nicht nur die älteste, sondern auch die verbreitetste.

Es bleibt jedoch beachtenswert, dass, obwohl auch hier das (meist gasförmige) Dielektrikum der Sitz der Energie ist, die dielektrischen Verschiebungsbahnen oder Induktionsröhren in Richtung der elektrischen Kraftlinien ihre Fuss- oder Ansatzstellen stets auf den beiden geriebenen Körpern

haben müssen und so gleichsam an diese gebunden erscheinen (vgl. Fig. 10 in 65). Für alle stationären (statischen) elektrischen Spannungszustände ist das Vorhandensein elektrisierter Körper mit korrespondierenden geladenen Oberflächen bezw. Grenzflächen, d. h. mit relativ stabilen Fusspunkten der Verschiebungsbahnen Vorbedingung, während dielektrische Verschiebungsbahnen, welche in ihrer ganzen Länge (kreislaufartig) im gasförmigen Dielektrikum, z. B. Luft, verlaufen, nur bei fortschreitenden elektromagnetischen Wellen (siehe H. I, 2 unter HERTZsche Schwingungen), d. h. sehr rasch vorübergehend (dynamisch) vorkommen. Jener Umstand enthält nicht nur die Berechtigung, die Körper mit den Fusspunkten der elektrischen Kraftlinien als in besonderem Zustand befindlich („elektrisiert") zu bezeichnen, sondern macht auch die frühere Fluidumsauffassung erklärlich.

Die Beobachtung der Allgemeinheit dieser elektrischen Spannungserregung zwischen irgend zwei geriebenen Körpern wird nur durch den Umstand erschwert, dass die Energiemengen sehr klein, der Zwangszustand verhältnismässig so hoch ist, dass die Isolierung und Erhaltung derselben nur in wenigen Fällen so eintritt, dass die Ausgleicherscheinungen augenfällig oder sonst (akustisch oder physiologisch) wahrnehmbar werden. Dass „Elektrisierungen" aber bei jeder beabsichtigten oder unbeabsichtigten Reibung zweier Körper thatsächlich eintreten, lässt sich experimentell nachweisen. Die Zahl der Forscher, welche auf diesem reibungselektrischen Gebiet eine Klärung herbeizuführen suchten, war von jeher sehr gross (vgl. WIED. I, 1045—1113); dennoch muss man gestehen, dass trotz des Alters und der Allgemeinheit dieser Erscheinungen unser Wissen auf diesem Gebiet nicht nur quantitativ sondern auch qualitativ unbestimmter ist als auf allen anderen. Abgesehen von der allgemeinen Kenntnis, dass bei jeder elektrischen Spannungserzeugung durch Reibung zweier Körper die Elektrisierung eine korrespondierende ist, d. h. vom Fluidumsstandpunkt positive und negative Ladung unbedingt stets gleich gross sein müssen, ist die Ausbeute der experimentellen Untersuchungen nicht sehr bedeutend und etwa in Folgendem zusammenzufassen.

Qualitativ darf als erwiesen gelten, dass einfache Berührung zwischen zwei heterogenen festen Körpern (Leiter oder Nichtleiter) dieselbe Elektrisierung liefert als absichtliche Reibung (vgl. WIED. I, 1051), d. h. dass jene Berührung stets mit einer hinreichenden Reibung der Oberflächenteilchen verbunden ist, um die elektrische Spannungserregung zu bewirken. Dass eine früher wohl vermutete Beschränkung der Elektrisierung auf Isolatoren nicht vorliegt, sondern dass gut gegen Erde bezw. den Experimentator isoliertes Metall bei Reibung gleichfalls elektrisch wird, wurde gleichfalls erwiesen und die früher beobachtete Beschränkung der „Elektrisierung" auf Isolatoren auf die rasche unvermerkte Ableitung bei einigermassen leitenden Körpern zurückgeführt. Jedoch bereits der Sinn der Elektrisierung, d. h. die Polarität jedes der geriebenen Körper nach der Trennung, stellt sich als ausserordentlich unsicher und so stark von der Oberflächenbeschaffenheit und der Art der Reibung heraus, dass von den vielen aufgestellten reibungselektrischen Reihen eigentlich keine als zuverlässig gelten kann. Als Beweis seien von den vielen widersprechenden Beobachtungen (vgl. WIED. I, 1058—1073) nur folgende erwähnt: „Hartgummi wird durch langsames Streichen mit einem Leintuch oder der Hand negativ, durch schnelles positiv. Gips wird durch Reiben mit weisser Seide auf dem Hauptblätterdurchgang positiv, auf dem zweiten,

der Glasglanz zeigt, negativ u. s. w. „Beim Hin- und Herreiben eines Glasstabes mit dem Pelz der Hinterbeine und des Halses einer Wildkatze wird derselbe positiv, beim Reiben nur in einer Richtung negativ, in letzterem Falle mit dem Pelz des Rückens positiv". Feuchtigkeitsverhältnisse und dergleichen scheinen vielfach von entscheidendem Einfluss zu sein. Von den mannigfachen reibungselektrischen Reihen scheint nur folgende von Riess eine gewisse Zuverlässigkeit, wenigstens bei den mit sicher bezeichneten Gegenständen zu besitzen (vgl. Riess, Reib.-El.), wobei unter jeder Nummer je eines der links angeführten Materialien mit je einem der rechts unter der gleichen Nummer angeführten gerieben gedacht ist.

Positiv elektrisch:	Negativ elektrisch:
1) Pelz der Raubtiere, struppiges Menschenhaar.	1) Glas, Porzellan, Holz, Metalle, Harze, Schwefel.
2) Glas.	2) Zinn-Zink-Amalgam auf Leder (sicher).
3) Pelz, Wolle, Leinen, Seide, Papier, Metalle.	3) Colophon, Siegellack, Schwefel, Schellack, Bernstein (sicher).
4) Diamant, Topas, Axinit, Bergkrystall, Kalkspat, Glimmer, poliertes Glas.	4) Wolle, Leinen, Seide, Leder.
5) Glas, Seide.	5) Metalle.

Eine (allerdings auch nicht immer zuverlässige) Reihenfolge in Gestalt einer Art Spannungsreihe hat Faraday (vgl. Exp. Res. Bd. II, 2141) aufgestellt, welche lautet:

+ Katzenfell, Bärenfell — Flanell — Elfenbein — Federkiel — Bergkrystall — Flintglas — Baumwolle — Leinwand, Canevas — weisse Seide — die Hand — Holz — Lack — Metalle (Eisen, Kupfer, Messing, Zinn, Silber, Platin) — Schwefel. —

Bemerkenswert ist, dass Wasser bei Reibung mit allen Körpern positiv elektrisch wird (vgl. Exp. Res., 2107); siehe hierzu auch **81** unter Dampfelektrisiermaschinen und **82** unter Berührungselektrizität der Erde.

Erwähnenswert bleibt noch die Elektrisierung pulverförmig zerkleinerter Körper bei Reibung gegen andere feste Körper, z. B. Siebe oder Gaze, sowie der spezielle, praktisch zur Erforschung der Flächenelektrisierung (sicher allerdings nur bei Dielektricis, z. B. einer Harzfläche) benutzte Fall der Durchbeutelung eines Gemisches von Mennige und Schwefelpulver durch Gaze, wobei Schwefel negativ, Mennige positiv wird, obwohl jedes einzelne gegen Gaze negativ wird.

Da die einfache Flächenberührung zwischen zwei Körpern mit nachheriger Trennung beider in gleicher Weise wirkt wie ein reibendes übereinander Fortziehen der Flächen, so ist es auch erklärlich, dass die Aufhebung einer vorübergehenden oder längere Zeit vorher bestehenden Berührung die Ursache starker Elektrisierung werden kann; so wirkt das Abschälen zweier Berührungsflächen, wie beim Abziehen von Papier oder Film von ihrer Auflagefläche, oder des Treibriemens von der Riemenscheibe, oder das Spalten von Glimmerplatten und dergleichen häufig so stark elektrisierend, dass Funken überspringen können. Die Ursache der unabsichtlichen Er-

zeugung stärkerer elektrischer Ladungen ist vielfach in einem solchen Abschälungsprozess zu suchen. Der Vorgang der Spannungssteigerung ist genau in gleicher Weise wie unten bei der Elektrisiermaschine aufzufassen (vgl. **81**). Diese Spannungserregung ist aber nicht nur auf die Reibung von festen Körpern gegen einander beschränkt; überall wo Flüssigkeitsteilchen sich vorübergehend an festen Körpern reiben, tritt zwischen beiden der elektrische Spannungszustand auf, wogegen reine Gase, z. B. getrocknete Luft, keine Elektrisierung hervorrufen (vgl. FARADAY, Exp. Res., Bd. II, 2132). Hierzu gehört wohl auch die von LENARD (vgl. ETZ 92, 514) gemachte, sowie von ELSTER und GEITEL (vgl. ETZ 92, 699) bestätigte Beobachtung, dass bei Wasserfällen das Aufschlagen des Wassers am Fuss des Falles eine Elektrisierung bewirkt, bei welcher das Wasser positiv elektrisch wird, die über dem Wasser befindliche Luft negativ elektrisch geladen bleibt.

Der Umstand, dass die Reibung nicht nur materiell heterogener Körper, sondern auch gleichartiger, falls sie sich nur unter etwas verschiedenen Verhältnissen befinden, namentlich in verschiedenen Aggregatzuständen, wie Eis und Wasser, merkliche elektrische Spannungen zwischen ihnen zu erzeugen vermag, ist unter anderem von SOHNCKE zur gut gestützten Erklärung der Gewitterelektrizität benutzt worden. Dieselbe wird auf folgenden Vorgang in der Atmosphäre zurückgeführt. Wenn die Temperaturabnahme von der Erdoberfläche nach oben einen gewissen Betrag überschreitet (rund 1° C. auf 100 m), was namentlich leicht in den Sommermonaten gegen Nachmittag eintritt, wenn die Sonnenstrahlung die dem Erdboden angrenzende Luftschicht stark geheizt hat, so tritt labiles Gleichgewicht in der Atmosphäre ein, insofern jeder Cubikmeter Luft beim Aufsteigen um 100 m weniger mkg Arbeit benötigt als sein Wärmeüberschuss gegen jeden cbm jener höheren Luftschicht beträgt, so dass ein fürs erste latenter Auftrieb besteht. Wird an irgend einer Stelle der Luftdecke dieses labile Gleichgewicht gestört, so findet ein Durchbrechen der nächst höheren Luftschichten statt und unter Nachströmen der resultierenden Auftrieb besitzenden Luft an der Erdoberfläche zur Störungsstelle bildet sich daselbst ein aufsteigender Luftstrom aus. Diese wasserdampfhaltige Luftsäule verbraucht bei ihrem Aufsteigen Wärme (nach der Energiegleichung 1 Kalorie für 424 mkg Hebungsarbeit). In einer gewissen Höhe tritt daher Kondensation ein, wodurch sie ein aus Wasserbläschen bestehendes und uns als Cumulus (Gewitterkopf) erscheinendes Kapitäl erhält. Hat, wie nachgewiesenermassen im Sommer häufig, in diesen unter dem Gefrierpunkt liegenden Atmosphärenhöhen die Bildung sehr feiner Eisnadeln stattgefunden, so erzeugt die Reibung der relativ gegen die Eisnadelwolke aufsteigenden Wasserbläschenwolke zwischen beiden einen elektrischen Spannungszustand, der bei zunehmender Entfernung zwischen beiden (vgl. **81** bei der Elektrisiermaschine) sich steigert und die Gewitterentladungen entweder zwischen den Wolken selbst oder diesen und Erde hervoruft.

Vor Betrachtung der Apparate zur *absichtlichen* Erzeugung des elektrischen Spannungszustandes in Verbindung mit der Sammlung merklicher Mengen in Form von Spannungsenergie seien kurz die vorliegenden *quantitativen* Resultate bei reibungselektrischen Vorgängen angeführt.

Nach Untersuchungen von PÉCLET (vgl. WIED. I, 1055) an einer Elektrisiermaschine ist das Maximum der Ladung von an einander geriebenen Körpern nur durch die Natur der einander berührenden Stoffe bestimmt, d. h. der Elektrometerausschlag bei hinreichend langer Reibung von der Geschwindig-

keit der reibenden Flächen, dem Druck derselben gegeneinander, der Grösse der Oberfläche, der Art der Reibung, ob gleitend oder rollend, unabhängig, nur kleine Geschwindigkeiten und geringe Drucke zeigten — wohl auf äussere Verluste zurückzuführende — Abweichungen nach unten.

Untersuchungen von Riess über das Ansteigen bis zum Maximum ergaben folgendes (vgl. Wied. I, 1052):

Wurde ein mit Leder überbundener, unten flacher Metallcylinder in Form eines Gewichtstückes von etwa 40 mm Durchmesser oben an einem mit Schellack überzogenen Glasstabe befestigt, auf eine grosse Ebonitplatte gesetzt, um etwa 3 cm fortgezogen, seine Ladung am Sinuselektrometer geprüft, wurde er dann auf eine frische Stelle der Ebonitplatte gestellt, wieder 3 cm fortgezogen u. s. f. und so $n$mal an verschiedenen Stellen, so wuchsen die Ablenkungen des Sinuselektrometers A wie folgt:

I.	$n = 1$	2	4	8
	$A = 1$	1,45	1,67	1,93.

Bei direktem Fortschieben des reibenden Gewichtes um 8 × 3 cm ergab sich sofort der letztere Wert. Bei weiteren Reibungen änderte er sich nicht mehr bedeutend. Bei einem anderen Versuch, wo das Gewicht mit Blei belastet war und dasselbe um 1 × 3, 8 × 3 und 144 × 3 cm fortgeschoben wurde, waren die Ablenkungen 1, 1,93 und 2,38.

Beim Hinführen des Reibers über eine grössere unelektrische Stelle der geriebenen Fläche steigt also die in ersterem angehäufte Elektrizitätsmenge bis zu einem Maximum.

Wird der Reiber immer wieder auf derselben, also bereits elektrisierten Stelle der Ebonitplatte um 3 cm vorwärts geschoben, so erreicht er eine viel kleinere Ladung, als wenn er über immer neue unelektrische Stellen hingeführt wird. So war in diesem Falle bei gleichen Verhältnissen wie in der Reihe I:

II.	$n = 1$	2	4	8
	$A = 1$	1,14	1,14	1,09.

Ähnliches ergab sich, als der Reiber um 1-, 2-, 4-, 8mal 60 Grade um seine Achse gedreht wurde. Die Elektrizitätsmengen in ihm waren 7,6; 7,3; 8,1; 7,0. Auch dies entspricht völlig den Verhältnissen beim Kontakt. Die Differenzen der Zahlen können von der Ungleichheit der Grösse und Beschaffenheit der wirklich zur Berührung kommenden Stellen herrühren.

Riecke leitete aus ähnlichen Versuchen einige, wohl noch der Prüfung bedürftige Formeln ab (vgl. Wied. I, 1054), wonach folgt, dass „die durch Reibung erzeugte maximale elektrische Dichtigkeit um so kleiner ist, je grösser die Fläche des Reibers ist“ (vgl. hierzu auch ETZ 91, 183).

Zuverlässige Resultate über spezifische Reibungsspannungen in Volt scheinen noch zu fehlen, was wohl auch zum Teil auf die Vorliebe der meisten Physiker für relative Messungen zurückzuführen ist. Erwähnenswert wären an dieser Stelle nur noch die Versuche von A. E. Becquerel über die Wirksamkeit verschiedener Stoffe auf dem Reibzeug (vgl. Wied. I, 1096):

Ein Funkenmikrometer wurde mit dem Konduktor der Scheibenelektrisiermaschine verbunden und der Maximalabstand A der Kugeln bestimmt, bei dem bei gleichmässiger Drehung der Scheibe noch Funken überschlugen, wenn auf die Reibzeuge mit etwas Fett verschiedene Pulver gebracht wurden. Demnach ist für Zink-Zinnamalgam, Musivgold $A = 100$ bis 140 mm; Talk, Schwefelantimon, Braunstein, Mehl 70 bis 100 mm; Gaskohle, Graphit, Zinkoxyd 40 bis 80 mm; Stanniol, Schwefelblumen 20 bis 40 mm; Bärlappsamen, Seifenpulver, A sehr klein.

81. Reibungs-Elektrisier-Maschinen.

Betrachtet man mit Rücksicht auf die quantitativen Versuchsergebnisse diejenigen Vorrichtungen, welche als Maschinen eine gewisse technische Seite darbieten und bezüglich dieser auf besondere Beachtung der quantitativen

Verhältnisse hingewiesen sind, so bemerkt man, dass die Entwickelung der Elektrisiermaschinen (vgl. **2**, **3** und **5**) sich rein empirisch in einer Weise vollzogen, die eine gewisse Berücksichtigung des Quantitativen einschliesst. Unter cyklischer Ausbildung des beweglichen der beiden zu reibenden Körper ist eine dauernde Erregung des Spannungszustandes auf der einen Seite durch die Wegschaffung bezw. Ableitung der Spannungsenergie auf der anderen ermöglicht und die Vorrichtung erhält gleichzeitig einen polaren Charakter, der eine fortgesetzte nutzbringende Reibung ermöglicht, wenn zwischen jenen beiden korrespondierenden Enden (Polen) der Maschine der Kreislauf so weit geschlossen wird, um einen Ausgleich und damit eine erneute Energiewandlung zu gestatten. Fig. 27 stellt eine einfache Elektrisiermaschine mit ihren wesentlichen Teilen vor. Das grundlegende reibungsmechanisch-elektrische „Elementenpaar“ besteht einerseits aus der Glasscheibe S (wofür auch ein anderes dielektrisches Material mit guter Isolationsfähigkeit treten könnte) und dem Reibzeug, hier Leder, das zunächst mit etwas wasserfreiem Fett (Schweinefett) und hierauf mit feingeriebenem Spiegelamalgam oder KIENMAYERschem Amalgam (1 Teil Zinn, 1 Teil Zink, 2 Teile Quecksilber) eingerieben ist. Dieses Reibzeug, welches mit einer Schraube fest gegen die Scheibe angedrückt werden kann, ist leitend mit der Metallkugel M, dem „Konduktor des Reibzeuges“ verbunden; sie bilden den einen Pol oder auch die eine Belegung der Maschine; der am gegenüberliegenden Ende des Scheibendurchmessers befindliche „Konduktor“ C in Verbindung mit den dicht an den Scheibenrand herangehenden metallnen „Saugspitzen“ den anderen. Beim Drehen der Maschine in Pfeilrichtung hat man



Fig. 27.

sich die Wirkungsweise auf Grund der neueren Auffassung ungefähr in folgender Weise vorzustellen: Jeder etwa von gleicher Breite wie das Reibzeug gedachte Streifen der Glasscheibe wird bei dem mit Reibung zwischen beiden verknüpften Vorübergang in den elektrischen Spannungszustand versetzt, so dass er momentan mit dem Reibzeug einen Kondensator mit einer bestimmten Ladung bildet (vgl. hierzu Fig. 10 der Hülfsvorstellungen). Diese Ladung Q hängt nach der Formel $Q = C \cdot E$ (vgl. **5**) von der Kapazität C_1 zwischen Reibzeug und Glasplatte ab, welche im ersten Moment verhältnismässig gross ist, wegen der kleinen Entfernung der koresspondierenden Punkte, wogegen die Spannung E zwischen beiden im ersten Moment zwischen den einzelnen korrespondierenden Punkten verhältnismässig klein anzunehmen ist, weil sonst unter Durchbrechen der Trennungsschicht der Ausgleich eintreten würde. Beim Weiterdrehen des Glasscheibenstreifens, den wir hier allein zu betrachten haben, da alle folgenden unter cyklischer Vertauschung dieses Elementes sich ganz entsprechend verhalten, wird aber die Kapazität C_1 rasch abnehmen (vgl. hierzu **5**) und dementsprechend E wegen der Konstanz von Q — bei Vernachlässigung des Verlustes durch Selbstentladung — rasch steigen müssen. Gleichzeitig wird die elektrische Spannungsenergie $A = \frac{1}{2} Q \cdot E$

proportional mit E steigen, was nur unter Aufwendung und Umsetzung einer gleichwertigen Menge mechanischer Energie durch Überwindung der zwischen S und R bestehenden Anziehung geschehen kann. Um bei dem raschen Ansteigen von E beim Verlassen von R die Selbstentladung in Gestalt des als Funken oder Glimmlicht zwischen Scheibe und Reibzeug auftretenden Ausgleiches nach Möglichkeit zu verhindern, pflegt man anschliessend an das Reibzeug in Drehrichtung einen Schutzmantel aus einem festeren Dielektrikum als Luft, gewöhnlich Wachstaffet, über der Scheibe in der Breite des erregten Streifens anzubringen (vgl. Fig. 27), bis der letztere hinreichend von R entfernt bezw. näher an den Saugspitzen des Konduktors C ist als an R. Die Kapazität C_1 des Streifens gegen R, oder schliesslich auch gegen die gesamte Umgebung, falls R mit der Erde verbunden ist, hat bei der Annäherung an C ausserordentlich stark ab- und die Spannung E ebenso zugenommen, so dass das Bestreben der auf dem Streifen von S angesammelten Spannungsenergie durch Herunterfallen auf ein tieferes Niveau (E) wenigstens einen teilweisen Ausgleich herbeizuführen — natürlich unter gleichzeitiger Umwandlung eines Teiles der elektrischen Energieform in eine tiefere (Wärme) — in gleicher Weise gewachsen ist. Die gegenüber der Kapazität des Streifens grosse Kapazität des Konduktors (C) kommt diesem Bestreben entgegen, wenigstens solange C noch erheblich geringere Spannung gegen die Umgebung besitzt als der hochgespannte Glasstreifen; sobald daher der letztere den sog. Saugspitzen gegenüber angelangt ist, an welcher Stelle die zwischen ihm und C befindliche Dielektrikumsschicht (Luft) bezüglich ihrer dielektrischen Festigkeit ausserordentlich stark beansprucht wird — ähnlich wie ein mechanischer Druck mit Hülfe einer Spitze auf irgend ein festes Material ungleich stärker wirkt als bei Verteilung des Druckes über eine Fläche — wird die Spannungsdifferenz zwischen dem Glasstreifen und dem Konduktor C den Durchbruch bewirken und einen Ausgleich herbeiführen. Verläuft der letztere nicht aperiodisch, sondern verursacht die Kombination der beim Ausgleich in Frage kommenden Grössen (vgl. H. I, 2 in **197**) ein über das Ziel Hinausschiessen, so wird der Streifen beim Weiterdrehen nicht nur nicht entladen sein, sondern sogar eine entgegengesetzte (negative) Ladung aufweisen können, wie auch die Erfahrung lehrt (vgl. Wied. I, 1104). Ebenso bestätigt sich die aus der entwickelten Auffassung von dem Wirken der Maschine zu folgernde Erwartung, dass „abgesehen von Nebenumständen, ungleichen Reibungen, Ableitungen u. s. f. die in den Maschinen erregten Elektrizitäts m e n g e der in der Zeiteinheit geriebenen Fläche des Dielektrikums, also der Zahl der Umdrehungen, der Oberfläche (Durchmesser) der Scheibe oder des Cylinders der Maschine und der radialen Länge des Reibzeuges proportional ist“ (vgl. Wied. I, 1096).

Eine Anzahl weiterer Eigentümlichkeiten der Maschine, welche zum Zwecke der Aufsammlung grösserer Mengen von Spannungsenergie auf C bezw. ausreichender Erneuerung bei deren Ableitung beachtet sein wollen, ergiebt sich auch in Übereinstimmung mit der angeführten Auffassung. Da die gesammelte Energiemenge $A = \frac{1}{2} Q \cdot E = \frac{1}{2} C_2 \cdot E^2$, so darf keiner der beiden Faktoren eine zu geringe Grösse haben, wenn A nicht unbefriedigend klein ausfallen soll. Neben einem leicht erhältlichen hohen Wert von E darf daher auch die Kapazität C_2 des Konduktors C nicht zu klein sein. Unter Berücksichtigung des Umstandes, dass C_2 nicht nur von der Oberfläche von C, sondern ebenso von der korrespondierenden Belegung (vgl.

Hülfsvorstellungen Fig. 7 und 10), d. h. dem dielektrischen Widerstand der zwischen beiden Belegungen befindlichen Zwischenschicht abhängt, erklärt sich ohne weiteres die geringe Wirksamkeit der Maschine, wenn M (Fig. 27) isoliert bleibt; die Kapazität (C_2, M) wird in diesem Falle noch durch das zwischenliegende C_1, d. h. die Kapazität (C_1, M) beeinträchtigt und alsdann

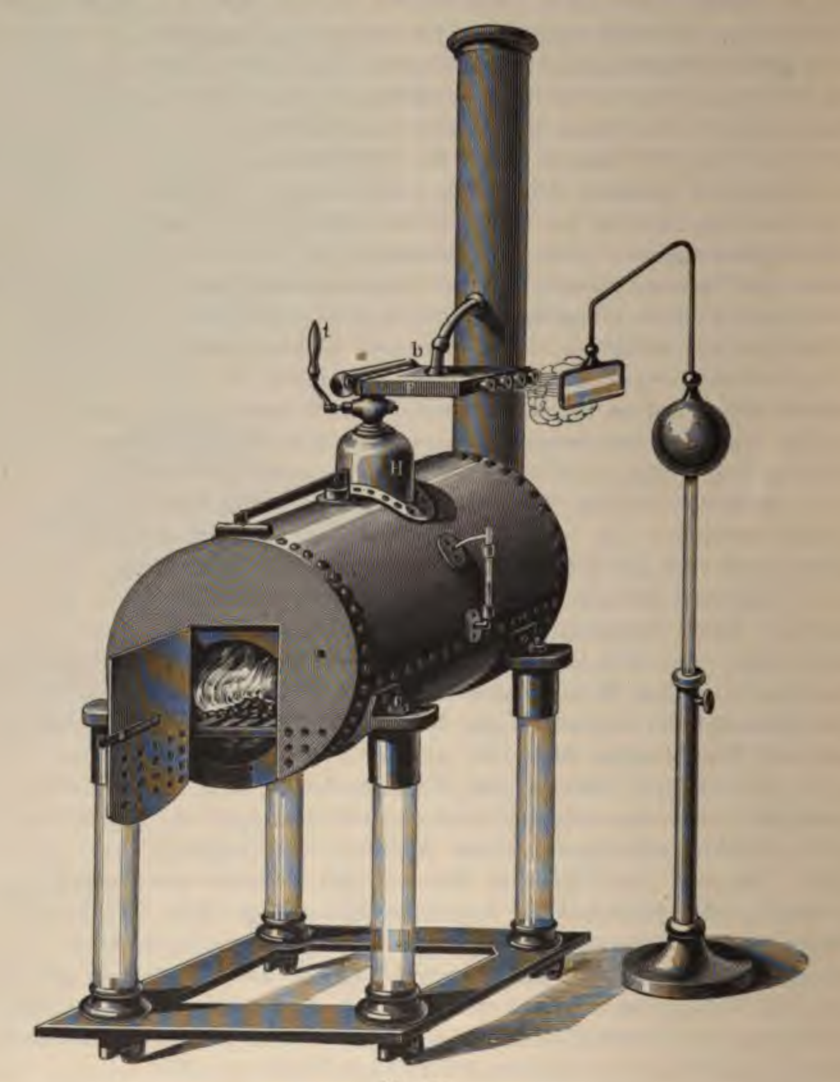


Fig. 28.

die Spannung zwischen C_2 und C_1 zu rasch auf einen Wert vermindert, der einen Durchbruch bei den „Saugspitzen" nicht mehr bewerkstelligen kann. Wird dagegen M mit der Erde verbunden, wodurch die korrespondierende Belegung zu C durch die r i n g s u m befindliche, auch nur einigermassen leitende Umgebung gebildet wird, so wird hierdurch die Kapazität (C_2, Erde) erheblich vergrössert. Aus demselben Grunde wird man um negativ gespannte Energie auf M zu sammeln, den Konduktor C mit Erde verbinden. Praktisch sind diese Elektrisiermaschinen mit Benutzung der Dauerreibung

jetzt meist durch die viel leistungsfähigeren Influenzmaschinen (vgl. **139**) verdrängt worden, deren Verhältnis zu jenen gewöhnlichen Elektrisiermaschinen in vieler Beziehung demjenigen der Dynamos zu den älteren Magnetmaschinen, d. h. denjenigen mit permanenten Magneten gleicht.

Von sonstigen Vorrichtungen zur Erzeugung und Sammlung grösserer Mengen von Reibungselektrizität besitzt die Dampfelektrisiermaschine von Armstrong wohl das meiste technische Interesse. Ihre Gesamtansicht nebst Schnitt durch die Erzeugungsstelle der Spannung, das sind die Düsen *d*, lassen die Fig. 28 bis 30 erkennen. Wenn der übersättigte teilweise kondensierte, d. h. bereits Tröpfchen von Wasser (oder auch einer sonstigen Flüssigkeitsmischung) führende Dampf sich beim Ausströmen an der Pfeilstelle der Fig. 30 — einer von dem Messingring vorspringenden Platte — reibt, so wird letztere und der mit ihr verbundene aber gegen Erde isolierte Kessel negativ, die Flüssigkeitsteilchen und der von ihnen berührte Saugekamm



Fig. 29.



Fig. 30.

nebst Konduktor (vgl. Fig. 28) positiv elektrisch. Über die Leistungsfähigkeit sowie den Nachweis der Unwirksamkeit reinen (gasförmigen) Dampfes vgl. **18.**

Die mit dem Dampfdruck in folgender Weise zunehmende Spannung zwischen Kessel und positiven Konduktor (vgl. Wied. I, 1080) gemessen durch die Ausschläge A eines Henleyschen Quadrantenelektrometers

Druck	=	0·5	0·75	1	1·5	2	2·33	3	Atmosphären
A	=	4	22	28	38	80	85	90	

hängt wohl mit der wachsenden Ausströmungsgeschwindigkeit zusammen.

Zum Schluss sei noch erwähnt, dass vom Standpunkt der sehr hohen Spannungen, wie sie bei reibungselektrischen Erscheinungen, also auch bei Ansammlung von isolierter Spannungsenergie gewöhnlich vorliegen, oder der elektrischen Druckunterschiede gegen Erde etwa folgende Trennung der Materialien vorzunehmen ist (vgl. Wk. IIIa, 26):

Gute Leiter sind: Alle Metalle, viele Schwefelmetalle wie Bleiglanz, Schwefelkies, ferner alle Lösungen von Säuren und Salzen, Wasser, wenn es nicht vollkommen rein ist.

Schlechte Leiter oder Isolatoren sind: trockene Salze, Metalloxyde, trockene Gase, die meisten organischen Verbindungen, welche nicht Salze sind, ganz reines Wasser, ferner Harze, Seidenfäden, Kautschuck, Ebonit, Glimmer, Glas. Ist auf der Oberfläche dieser Körper Wasser hygroskopisch kondensiert, so leiten sie, d. h. die kondensierte Wasserschicht, die immer Spuren von Salzen enthält, leitet. —

Über Influenzmaschinen siehe unter **139.**

Die Zurückführung des Ursprunges der Reibungselektrizität auf chemische Vorgänge bei der Reibung und damit die Annäherung an die Ursache unter 2 glaubt C. Christiansen auf Grund seiner Versuche vornehmen zu müssen (vgl. 1894 Wied. Ann. 53, 401 oder auch ETZ 94, 654).

Die nach derselben Richtung gehende Ansicht von HELMHOLTZ, dass es bei der sogenannten Reibungselektrizität nicht auf Reibung, sondern auf innige Berührung der beiden Körper ankommt, wird auch durch Versuche von HOLZ (vgl. 1893 WIED. Ann. 50, 147 bezw. ETZ, 512) gestützt.

2. Spannungserregung durch chemische Vorgänge (Berührungselektrizität).

82. Werte von Berührungsspannungen.

In der geschichtlichen Entwickelung der Elektrophysik war die Grundthatsache bereits eingehender behandelt worden, dass die Berührung heterogener Leiter der Elektrizität — abgesehen von den etwaigen nebenhergehenden reibungselektrischen Erscheinungen, wobei der Ausgleich oder die Entladung, z. B. durch vorübergehende Ableitung die etwa vorhandene reibungselektrische Spannung zu beseitigen gestattete — die Ursache einer dauernden elektrischen Verschiedenheit in Gestalt einer elektrischen Spannung zwischen jenen Leitern bildet und den Ausgangspunkt des Galvanismus darstellt (vgl. **10**). Die Aufdeckung der Bedingungen für eine solche Spannungserzeugung war, wie gleichfalls dort gezeigt, in rascher Aufeinanderfolge namentlich durch VOLTA erfolgt. Die eigentliche Ursache dieser Erscheinungen, welche VOLTA und seine Anhänger in der einfachen Thatsache der Berührung sahen, bildete den Ausgangspunkt wohl einer der erbittersten und am längsten dauernden Kämpfe, welche auf wissenschaftlichem Gebiet ausgefochten worden sind. Erst nach nahezu 100 Jahren scheint am Ende des 19. Jahrhunderts die endgiltige Lösung dieser Streitfrage erfolgt und die sogenannte chemische Theorie gegenüber der sogenannten Kontakt-Theorie den Sieg in der Erklärung, das ist im vorliegenden Fall in der Festlegung der eigentlichen Ursache davongetragen zu haben.

Die bisher aus allen Untersuchungen sich ergebende Unsicherheit in der Bestimmung der eigentlichen (absoluten) Werte der vermeintlichen Berührungsspannung zwischen je zwei verschiedenen Leitern erklärte sich hierbei gleichfalls dahin, dass in allen diesen Fällen trotz aller Vorsichtsmassregeln nicht die reine, d. h. eigentliche Berührungsspannung gemessen worden war, sondern eine kombinierte Spannung, bei welcher der unkontrollierbare Zwischenwert bei den einzelnen Messungen variierte (siehe weiter unten).

Nach unserem jetzigen Wissensstande können wir zwar diese reinen Berührungsspannungen in den später (**84**) folgenden Werten ermitteln, doch interessieren neben diesen erst durch etwas umständliche Messungen und Überlegungen erhältlichen und in erster Linie wissenschaftlich-theoretisch wichtigen Werten auch noch die ungefähren, praktisch auftretenden Spannungen, welche früher als die eigentlichen und reinen Berührungsspannungen galten. Das nächstliegende Bestreben in diese Spannungswerte, welche zwischen irgend zwei den elektrischen Spannungszustand „fortleitenden" Materialien auftreten und so der Beobachtung zugänglich sind, eine das Gedächtnis entlastende wissenschaftliche Ordnung zu bringen, veranlasste die Trennung der Leiter in zwei grosse Klassen, denn die Unmöglichkeit alle Stoffe auch nur in eine qualitativ einheitliche Spannungsreihe einzuordnen, ergab sich bei den ersten Versuchen nach dieser Richtung (vgl. **10**).

Diese von VOLTA vorgenommene Einteilung in Leiter erster und zweiter Klasse kann man auch vom Standpunkt der neueren Auffassung unter etwas anderer Formulierung der Definition (vgl. später) beibehalten.

Betrachten wir die qualitativen vor den quantitativen Verhältnissen, so gestattet die Heraushebung der Metalle nebst einigen ihrer Superoxyde und Schwefelverbindungen aus der Gesamtheit der elektrischen Leiter eine Spannungsreihe aufzustellen, die sich bei den Untersuchungen durch verschiedene Forscher (VOLTA, SEEBECK, PÉCLET, MUNK, PFAFF u. a.) im grossen und ganzen übereinstimmend ergeben hat, wenn auch bei Nachbarn in der Reihe mit sehr geringfügigen Spannungsdifferenzen infolge kleiner chemischer Unreinheiten, verschiedener Behandlung der Oberfläche (Politur) u. s. f. selbst Verschiebungen im Vorzeichen nicht ausgeschlossen sind. Diese Reihe wäre von positiv zu negativ nach AUERBACH folgende (vgl. Wk. IIIa, 113), jedoch sei, um die bei Wahl des Vorzeichens leicht eintretenden Verwechselungen zu vermeiden, noch besonders betont, dass das Vorzeichen sich auf die Berührungsstelle der beiden Metalle, bezw. in den späteren Tabellen überhaupt Leiter bezieht, und somit nach MAXWELLs Vorstellung daselbst die elektrische Verschiebung (Spannung der Doppelschicht) in der Richtung von dem mehr nach + zu nach dem mehr nach — zu stehenden Leiter geht, so dass bei dem Kreislaufcharakter des Spannungsverlaufs (entsprechend der Strömung bei geschlossenem Leiterkreis) die freien, d. h. nach aussen liegenden Enden das umgekehrte Vorzeichen besitzen:

+		Wismuth . .	Bi	Kupfer . . .	Cu	Platin . . .	Pt
Aluminium .	Al	Neusilber . .	Ns	Silber . . .	Ag	Palladium . .	Pd
Zink	Zn	Messing . .	M	Gold	Au	Schwefelkies	
Zinn	Sn	Quecksilber .	Hg	Kohle . . .	C	Braunstein	
Cadmium . .	Cd	Eisen . . .	Fe	Uran		Bleisuperoxyd	
Blei	Pb	Stahl . . .	Stl	Tellur		—	
Antimon . .	Sb						

Hierzu wäre noch zu bemerken, dass für diese Klasse von Leitern die Temperatur keinen merkbaren Einfluss auf die Spannungsreihe zu haben scheint, vorausgesetzt natürlich, dass beide Metalle dieselbe Temperatur besitzen.

Zieht man auch die Leiter zweiter Klasse (Elektrolyte) mit in den Kreis der Betrachtung, so werden die Verhältnisse nach den früheren Untersuchungen immer komplizierter und gleichzeitig immer unsicherer.

Die Flüssigkeiten lassen sich nicht nur nicht mit den Metallen zusammen, sondern nicht einmal unter einander in eine gemeinschaftliche Spannungsreihe einordnen, nur beschränkte Reihen sind aufstellbar, so dass der Wert der Ergebnisse dieser Untersuchungen schon aus diesem Grunde zweifelhaft erscheinen muss (vgl. Wk. IIIa, 116).

Für Kombinationen zwischen Metallen und Flüssigkeiten (Elektrolyten) liegen die Verhältnisse ein wenig günstiger, doch kann von allgemeinen Gesetzen hier auch kaum die Rede sein: vielmehr ist man genötigt für jede Flüssigkeit eine eigene Reihe zu bilden, welche sich als Spannungsreihe der Einzelmetalle mit dieser Flüssigkeit (nicht zweier Metalle in einer Flüssigkeit wie bei Elementkombinationen (vgl. weiter unten) — darstellt, doch ist auch hier die Konzentration der Flüssigkeiten von erheblichem Einfluss, sowie überhaupt gewisse Unsicherheiten, d. h. unkontrollierbare Momente auch diesen aufgestellten Reihen nur eine ungefähre Richtigkeit verleihen. Unter Benutzung der obigen Symbole und Abkürzungen für die Metalle bezw. wichtigen Metallverbindungen wären nach AUERBACH

(vgl. Wk. IIIa, 114) folgende Spannungsreihen der Leiter erster Klasse mit solchen zweiter vorliegend, wobei die Grenze zwischen positiver und negativer Erregung durch *O* gekennzeichnet ist; und wiederum die Richtung von + nach — die Richtung der „Verschiebung“ an der Berührungsstelle anzeigt.

Spannungsreihen der Metalle u. s. w. **mit** Flüssigkeiten:

Ätzkali	(+ fehlt)	O	Ag	Stl	Pt	Au	Cu	Pb	Sb	Zn	Sn	—		
Ammoniak	(+ fehlt)	O	Cu	Fe	Ag	Pb	Sn	Zn	—					
Schwefelsäure	+	Pb	Ag	Au	Pt	Cu	Fe	O	Zn	Sn	Sb	—		
Salpetersäure	+	Stl	Pt	Au	Pb	Sn	Cu	O	Zn	Sb	Fe	—		
Salzsäure	+	Stl	Pt	Au	Ag	Sb	O	Cu	Pb	Sn	Zn	—		
Zinnchlorür	+	Zn	O	Sn	Pb	Fe	Stl	Bi	Cu	Sb	Ag	Au	Pt	—
Zinnchlorid	+	Zn	O	Pb	Bi	Cu	Sb	Ag	Au	Pt	Stl	—		
Eisenchlorid	+	Pb	Au	Pt	Sn	Sb	Zn	Stl	Ag	Bi	Cu	O	—	
Salpeters. Silberoxyd . . .	+	Zn	Sn	Pb	Stl	Bi	Cu	Sb	Ag	O	Pt	Au	—	
Schwefels. Kupferoxyd . .	+	Zn	Sn	Pb	Fe	Bi	Cu	Sb	Ag	O	Pt	Au	—	
„ Zink	+	Sb	O	Pt	Au	Ag	Cu	Bi	Fe	Pb	Sn	Zn	—	
„ Eisenoxydul . .	+	Sn	Pb	O	Pt	Au	Cu	Ag	Sb	Bi	Fe	Zn	—	
Jodkalium	+	Sn	Bi	O	Pt	Au	Cu	Fe	Pb	Zn	Ag	Sb	—	
Salmiak	+	Sn	Pb	Bi	Sb	Cu	Fe	Ag	O	Au	Zn	Pb	—	

Taucht man in ein und dieselbe Flüssigkeit zwei verschiedene Metalle getrennt voneinander und untersucht ihren gegenseitigen elektrischen Spannungszustand, so wird derselbe durch folgende Reihen gekennzeichnet, wobei das am eingetauchten Ende positiv werdende Metall stets das weiter nach links zu stehende ist und die elektrische Druckdifferenz oder Spannung zwischen beiden um so grösser ist, je weiter sie voneinander entfernt stehen.

Spannungsreihen der Metalle **in** Flüssigkeiten:

Wasser	+	Zn	Pb	Sn	Fe	Sb	Bi	Cu	Ag	Au	—				
Verdünnte Schwefelsäure .	+	Zn	Cd	Fe	Sn	Pb	Al	Ni	Sb	Bi	Cu	Ag	Pt	—	
„ Salpetersäure .	+	Zn	Cd	Pb	Sn	Fe	Ni	Bi	Sb	Cu	Ag	—			
Conc. Salpetersäure . . .	+	Cd	Zn	Pb	Sn	Fe	Bi	Cu	Sb	Ag	Ni	—			
Cyankalium	+	Zn	Cu	Cd	Sn	Ag	Ni	Sb	Pb	Hg	Pd	Bi	Fe	Pt	C —

Dass in quantitativer Beziehung die Resultate der einzelnen Beobachter noch weiter auseinandergehen werden, ist bei der bereits bestehenden qualitativen Unsicherheit nicht zu verwundern. Die vom wissenschaftlichen Standpunkt aus angestrebte ideale Formulierung, um die zwischen irgend zwei in Berührung stehenden Leitern auftretende Spannung gesetzmässig auszudrücken, würde offenbar schematisch durch $f(1,3) = f(1,2) + f(2,3)$ dargestellt sein, d. h. durch zahlenmässige Bestimmung der in irgend einer Einheit gemessenen Berührungsspannung zwischen je zwei in der Spannungsreihe aufeinanderfolgenden Leiter, z. B. Leiter 1 gegen 2, ferner 2 gegen 3 wäre auch die Spannung jeder beliebigen anderen Kombination, z. B. 1 gegen 3

durch einfache Summierung abzuleiten. Für die Leiter erster Klasse ist diese Ermittelung auch erfolgt, abgesehen von jenen schon erwähnten Unsicherheiten bezw. die Messfehlergrenzen weit überschreitenden Abweichungen der Beobachtungszahlen verschiedener Forscher. Nach den mit verbesserter Kondensator-Methode (vgl. WIED. I, 829) ausgeführten Messungen von HANKEL ergeben sich diese Teilspannungen zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Metallen in der als Normalspannung benutzten Differenz Zink — Kupfer = 100 ausgedrückt wie folgt (vgl. Wk. III a, 118):

Al		*Zn*		*Sn*		*Cd*		*Pb*		*Sb*		*Bi*		*Hg*		*Fe*		*Cu*		*Au*		*Pd*		*Ag*		*C*		*Pt*
	25		23		1		20		25		3		9		3		16		10		5		3		4		1	

Wie veränderlich jedoch diese Werte mit der Oberflächenbeschaffenheit sind, d. h. wie stark sie unter anderem von der Dauer abhängen, während welcher ihre frisch gefeilte oder polierte Oberfläche mit der Luft in Berührung ist, geht aus folgender Tabelle hervor, bei der der gewählte und etwa dem Nullpunkt beim Thermometer entsprechende Anfangspunkt durch die willkürliche Festsetzung Kupfer = 100 gegeben ist.

Grade der Berührungsspannungen bezogen auf geputztes Kupfer (100):

	Gefeilt	Geputzt	Nach 1 bis 2 Tagen	Nach 7 Tagen	Nach weiteren 2 Monaten
Al	209	225—220	—	165	140
Zn, amalg.	—	200 ?	—	—	—
Zn	192	200	188	—	157
Cd	175	181	—	164	139
Pb	151	156	—	135	151
Sn	145	149	—	164	152
Sb	131	131		121	113
Bi	118	130	116	110	106
Neusilber	—	125	—	—	105
Messing	—	122	110	—	—
Hg		119	60	—	—
Fe	—	116	—	100	95
Stahl	—	116—108	—	—	93
Gusseisen	—	116—108	—	—	96
Cu	—	100	—	86	—
Au	—	90	—	81	—
Pd	—	85	—	—	—
Ag	—	82	—	70	82
Coaks	—	78	—	78	—
Platin	—	77	—	—	

Weitere Untersuchungen nach dieser Richtung (vgl. WIED. I, 836) haben den erheblichen Einfluss der dünnsten Oberflächenschichten von Flüssigkeiten, kondensierten Gasen u. s. w. geliefert; ebenso den Einfluss der umgebenden Gase, indem Ersatz der Luft durch andere Gase, z. B. Schwefelwasserstoff nicht nur beträchtliche Änderungen der Werte, sondern geradezu eine Umkehrung der Vorzeichen herbeiführten (vgl. WIED. I, 838).

Eine von AYRTON und PERRY unter möglichst normalen Verhältnissen mit dem Quadrantenelektrometer durchgeführte Bestimmung der Berührungsspannungen zwischen Metallen in Luft — und zwar hier zwischen den freien Enden gemessen — besitzt für den Techniker wegen der benutzten absoluten Masseinheiten (Volt) ein gewisses Interesse (vgl. WIED. I, 831).

Spannungen in Volt zwischen den **freien** Enden metallischer Leiter in Luft:

	C	Cu	Fe	Pb	Pt	Sn	Zn	Zn amalg.	Messing
C	0	0,370	0,485	0,858	0,113	0,795	1,096	1,208	0,414
Cu	— 0,370	0	0,146	0,542	— 0,238	0,456	0,750	0,894	0,087
Fe	— 0,485	— 0,146	0	0,401	— 0,369	0,313	0,600	0,744	— 0,064
Pb	— 0,858	— 0,542	— 0,401	0	— 0,771	— 0,099	0,210	0,357	— 0,472
Pt.	— 0,113	0,238	0,369	0,771	0	0,690	0,781	1,125	0,287
Sn	— 0,795	— 0,456	— 0,313	0,099	— 0,690	0	0,281	0,463	— 0,372
Zn	— 1,095	— 0,750	— 0,600	— 0,210	— 0,981	— 0,281	0	0,144	— 0,679
Zn, amalgam.	— 1,208	— 0,894	— 0,744	— 0,357	— 1,125	— 0,463	— 0,144	0	— 0,822
Messing . .	— 0,414	— 0,087	0,064	0,472	— 0,287	0,372	0,679	0,822	0

Weitere Beobachtungen, welche jedoch alle unter einander etwas abweichen; siehe Wk. III a, 119 ff.

Noch weit unsicherer sind die meisten bisherigen Beobachtungen über die zahlenmässigen Werte der zwischen Metallen und Flüssigkeiten auftretenden Spannungen. Daher sollen dieselben hier nicht im einzelnen weiter behandelt sein, sondern im Anschluss an die gegenwärtig diese Erscheinungen am besten erklärende chemische Theorie mit Hülfe der Dissociationshypothese bei Lösungen.

Nur eine Tabelle sei zur Kennzeichnung der ungefähren bei festen Elektroden auftretenden Werte hier angeführt. Hierbei sei besonders auf die in sehr weiten Grenzen schwankenden Spannungswerte der Metalle gegen Wasser hingewiesen, welche in sehr hohem Grade von der Reinheit des letzteren abhängen; noch unbestimmter sind daher die Spannungswerte, welche Metalle gegen Erde annehmen, von der sich nur im allgemeinen soviel sagen lässt, dass sie elektrisch als Leiter zweiter Klasse aufzufassen ist, sowie, dass alle Metalle in Berührung mit ihr am freien Ende negativ werden.

Werte der elektrischen Spannung in Volt zwischen Metallen und Flüssigkeiten nach Ayrton und Perry:

	C	Cu	Fe	Pb	Pt	Sn	Zn	Zn amalgm.	Messing	H_2O destill.
Hg	0,092	0,308	0,502		0,156					
H_2O, destilliert	0,01 bis 0,17	0,269 bis 0,100	0,148	0,171	0,285 bis 0,345	0,177	− 0,105 bis + 0,156	0,100	0,281	
Lösung von Alaun, conc. bei 16,5°		− 0,127	− 0,653	− 0,139	+ 0,246	− 0,225	− 0,536		− 0,014	
Lösung von $CuSO_4$, conc. 15°		0,070								− 0,048
Lösung von $CuSO_4$, spec. Gewicht 1,087, 16°		0,103								
Lösung von NaCl, spec. Gewicht 1,18 bei 20,5°		− 0,475	− 0,605	− 0,267	− 0,856	− 0,384	− 0,565		0,485	
Lösung von NH_4Cl, conc., 15,5°		− 0,396	− 0,652	− 0,189	− 0,057	− 0,364	− 0,637		− 0,348	
Lösung von $ZnSO_4$, conc., 15,3°							− 0,430	− 0,281		− 0,161
10 Vol. H_2O (destilliert) / 1 „ H_2SO_4	ca. − 0,035							− 0,858		
Concentr. H_2SO_4	0,55 bis 0,85	1,113		0,720 bis 1,252	1,600 bis 1.300			0,848		
„ HNO_3					0,672					

Einwandsfreie Messungen, d. h. solche der reinen Berührungsspannungen zwischen Metallen und Flüssigkeiten oder zwischen Flüssigkeiten unter sich, kann man nur mit Hülfe der durch Bischat und Blondlot, Ostwald und Paschen ausgebildeten Tropfelektroden erhalten (vgl. bei Fig. 32 in 85), eine Methode, welche rasch eine derartige Ausbildung erfuhr, dass auch die Konzentrationsspannungen, d. h. die EMK, welche zwischen zwei Lösungen desselben Salzes aber von verschiedener Konzentration auftreten, der Messung mit ziemlicher Sicherheit zugänglich gemacht wurden. Die endgiltige einwurfsfreie Form der Tropfelektroden wurde von Paschen auf Grund einer Untersuchung über die zur Ausbildung der EMK bei Berührung von Elektrode und Elektrolyt erforderliche Zeit angegeben, deren Grössenordnung für Quecksilber-Elektrolyt dahin gefunden wurden, dass für eine Zeit $< 10^{-5}$ Sekunden die Spannung noch keinen merklichen Wert besitzt, aber von hier ab die Spannungskurve so ansteigt, dass bei etwa 10^{-3} Sekunden dieselbe sich bereits ihrem Maximalwert genähert hat (vgl. ETZ 91, 17).

86. Lösungs- und Jonen-Vorstellung

Da die für den Zusammenhang der EMK mit dem Konzentrationsgrad von Nernst und Planck aufgestellte Formel, beziehungsweise Theorie, sowie überhaupt die mit all diesen Fragen aufs innigste verknüpfte chemische Theorie des Galvanismus oder Voltaismus (der Berührungselektrizität), die neueren Anschauungen über die Lösungen (Elektrolyte) zur Grundlage hat, so soll dieselbe vor Aufführung jener Werte hier kurz entwickelt werden. Diese allerdings ins Chemische hinüberleitende Betrachtung ist doch, abgesehen von ihrer grundlegenden Bedeutung, schon im Hinblick auf den langdauernden Kampf auf dem Gebiet der Berührungselektrizität für den Elektrophysiker von grosser Wichtigkeit und bildet gleichsam das Bindeglied zwischen Elektrophysik und Elektrochemie. Auch darf

nicht aus dem Auge gelassen werden, dass zwar vorläufig die chemo-elektrischen Energiequellen oder sogenannten Primärelemente eine praktisch untergeordnete Rolle gegenüber den Dynamos spielen und sonach für den Techniker an Interesse zurückstehen, dass aber die energetisch nicht ausgeschlossene Auffindung bezw. Ausbildung eines rationell, d. h. ökonomischer als Dampfmaschinenanlagen arbeitenden Kohleelements unsere ganze heutige Dynamomaschinentechnik auf die Seite zu schieben vermöchte. Wenn auch die Ausbildung einer derartigen chemo-elektrischen Energiequelle mit rationeller wässeriger Oxydation (Verbrennung) der Kohle trotz vielfacher Bemühungen und einiger schwachen, aber noch zweifelhaften Ansätze als nicht nahe bevorstehend zu bezeichnen ist, so muss doch die jederzeit vorhandene Möglichkeit dem Techniker hinreichendes Interesse für die grundlegenden elektrochemischen Anschauungen einflössen, zumal die Sekundärelemende oder Akkumulatoren bereits eine so grosse praktische Rolle in der Elektrotechnik spielen.

Wie bereits in der geschichtlichen Entwickelung (vgl. **36**) dargelegt, hatte die ältere Vorstellung von GROTTHUS über die elektrolytische Leitung unter der Einwirkung des später erkannten Energieprinzipes (der Energiegleichung) durch CLAUSIUS die Abänderung erfahren, dass die in Lösung befindlichen Salzmoleküle nicht mehr fest miteinander verbunden, sondern als gleichsam labile und des Austausches mit Nachbarmolekülen fähige Jonen aufzufassen sind, welche zur Lösung und Bindung keine Energiewandlungen benötigen. Diese Auffassung erfuhr vom Jahre 1887 an durch ARRHENIUS, J. H. VANT'HOFF, OSTWALD, PLANCK, NERNST und andere die für das Gebiet der Berührungselektrizität ebenso wie für die Auffassung der Leitung in Elektrolyten (vgl. H. I, 2) und verwandte Gebiete fruchtbare Ausbildung, die unter dem Namen: Theorie der „elektrolytischen Dissociation“ oder auch der „freien Jonen“ zusammengefasst sei. Diese nunmehr auch von den meisten Vertretern der Wissenschaft anerkannte und damit gegenwärtig massgebende Anschauung auf diesem Gebiete erforderte eine völlige Umwälzung der früheren Vorstellung von einer Salzlösung als eines elektrochemisch wirksamen und elektrolytisch leitenden, flüssigen bezw. teilweise flüssigen Körpers. Die oben erwähnten Jonen, welche die beiden elektrochemisch gegensätzlichen, wirksamen Bestandteile (Atomgruppen) jedes Moleküls darstellen, sind hiernach in einer Salzlösung zum mehr oder weniger grossen Teil überhaupt nicht mehr als mit einander verbunden („sociiert“) anzusehen, vielmehr als dissociiert, d. h. gleichsam selbständig; dennoch ist ein derartiges für sich in der Lösung bestehendes Jon, z. B. das Metall-Jon *Na* in einer Kochsalzlösung (*Na Cl* in *aq*) nicht identisch mit einem völlig freien, d. h. ausgeschiedenen metallischen Atom des Elementes Natrium, vielmehr hat es trotz seiner innerlichen stofflichen Gleichheit völlig andere Eigenschaften auf Grund seines abweichenden Gehaltes an „freier Energie“, welche in diesem Falle durch die elektrische Ladung (vgl. hierzu auch die neuesten Auffassungen der Elektronentheorie in **79**) beeinflusst wird.[1])

---

1) Da der durch H. HELMHOLTZ eingeführte Begriff der „freien“ Energie bei den meisten neueren Betrachtungen eine wichtige Rolle spielt, so mögen die wichtigeren der von ROBERT HELMHOLTZ (Sohn von H. HELMHOLTZ) zusammengestellten Sätze über die „freie“ Energie hier angeführt sein (vgl. OSTWALD, S. 1010):

1. Jedem (chemischem) Körper oder System von Körpern kommt ein bestimmtes Quantum von freier Energie zu, welches nur von seiner Temperatur und seinem augen-

In den Molekülen des Elementes Natrium ist jedes Atom *Na* nach aussen unelektrisch, indem es beide elektrische Ladungen besitzt, das gelöste Jon *Na* hingegen erhält beim Lösungsvorgang eine sehr starke einseitige elektrische Ladung, welche mit der entgegengesetzten Ladung der ungelöst bleibenden Metallmasse korrespondiert und das elektrochemische Gleichgewicht ermöglicht. An Stelle dieser beiden entgegengesetzten Ladungen kann man nach Maxwells Vorstellungen auch eine die Grenzschicht zwischen Metall und Flüssigkeit (Helmholtz „Doppelschicht") durchsetzende elektrische Verschiebung treten lassen. Dass sowohl das eine wie das andere nur ein Bild für die thatsächlichen Vorgänge ist, braucht wohl kaum nochmals betont zu werden. Nach den neueren chemischen Vorstellungen besitzt nämlich jedes in einen Elektrolyten eingetauchte Metall einen bestimmten elektrolytischen Lösungsdruck, d. h. das Bestreben die Moleküle in Lösung, das ist den Jonenzustand überzuführen. Diesen Lösungsdruck stellt man sich am besten nach Analogie des Dampfdruckes vor; ebenso wie jede Flüssigkeit in Verbindung mit dem von der Flüssigkeit freien Raum ein — wenn auch zuweilen noch so geringes und graduell sehr verschieden starkes — Verdampfungsbestreben zeigt, dem durch die Verdampfung einer unter Umständen unwägbaren Menge in die angrenzende Atmosphäre das Gleichgewicht gehalten wird, wenn die Sättigung der letzteren erfolgt ist, so sollen auch beim Eintauchen eines Metalles in irgend eine elektrolytische Flüssigkeit, auch Wasser, (häufig unwägbare) Metallspuren gelöst, d. h. in den Jonenzustand übergeführt werden. Da diese gelösten Metallionen des vorher unelektrischen elementaren Metalles beim Lösungsakt eine starke einseitige elektrische Ladung erfahren, so muss das eingetauchte Metall die entgegengesetzte Ladung behalten

Das Bestreben zur Auflösung hat man sich als das Bestreben jeder Energieform von einer höheren Energiestufe auf eine niedere herabzufallen vorzustellen, insofern das metallische Jon *Na* mehr freie Energie in Gestalt chemischer, verfügbarer Energie besitzt als das ionisierte *Na* mit seiner

---

blicklichen Zustand (z. B. Aggregatzustand) abhängt, nicht aber von dem Wege, auf welchem dieser Zustand erreicht wurde.

Davon zu unterscheiden ist die Gesamtenergie, welche ausser der freien Energie noch das Äquivalent der im Körper enthaltenen unverwandelbaren Wärme umfasst.

2. Die Arbeit, welche durch irgend eine isotherme Zustandsänderung (z. B. chemischen Prozess, Lösung, Aggregatänderung, Änderung der Kapillarfläche) in maximo geleistet werden kann, ist zu messen durch die eintretende Abnahme der freien Energie, während die Differenz der Gesamtenergie das Maximum der gewöhnlichen Wärmeabgabe angiebt.

   Die freie Energie spielt also für chemische Systeme dieselbe Rolle, wie die potentielle für mechanische.

3. Demgemäss ist ein chemisches System nur dann im stabilen Gleichgewicht, wenn seine freie Energie den kleinsten bei der herrschenden Temperatur möglichen Wert angenommen hat.

   Von selbst eintretende Prozesse sind daher immer solche, welche das System von einem Zustande grösserer zu dem der kleinsten freien Energie hinführen.

   Beides gilt nicht von der Gesamtenergie, z. B. nimmt dieselbe bei Kältemischungen von selbst, d. h. durch Aufnahme äusserer Wärme zu ....

4. Im allgemeinen kann man also sagen, dass, wenn zwei Zustände eines Körpers in gegenseitiger Berührung vorkommen, ohne sich zu stören, dieselben gleiche freie Energie besitzen müssen.

5. Unter den möglichen isothermen Zustandsänderungen sind speziell die reversiblen die günstigsten. Denn nur sie leisten wirklich das Maximum der Arbeit, welche die Abnahme der freien Energie misst.

einseitigen elektrischen Ladung. Bei Ausschluss eines elektrischen Ausgleichs z. B. beim Eintauchen eines **reinen** Metalles *M* in eine Flüssigkeit *F* (vgl. Fig. 31) wird jene Energiedifferenz zunächst zur Bildung eines potentiellen Energiebetrages in Form eines elektrostatisch gespannten Systems verwendet bis zwischen Metall und Flüssigkeit jenes elektrochemische Gleichgewicht erreicht ist (reines Metall ist hier vorausgesetzt, um auch die sogenannten Lokalaktionen auszuschliessen, also die durch Unreinheiten, d. h. Vorhandensein der Spuren eines zweiten Metalles gegebene Möglichkeit ein parasitäres galvanisches Element zu bilden). Bei dieser Betrachtung ist zunächst von der etwa nebenbei bestehenden Möglichkeit für die chemische Energie direkt auf die (tiefste) Energiestufe der Wärmeenergie herabzufallen, abgesehen; ebenso soll auch auf die Rolle der Jonisierungswärme erst später (**86**) eingegangen werden. Jenes elektrochemische Gleichgewicht ist erreicht, wenn das Jonisierungsbestreben des Metalles, d. h. sein Fallbestreben auf eine tiefere Energiestufe, dem es durch das Eintauchen in die Flüssigkeit in, wenn auch häufig sehr geringem Grade nachgeben kann, kompensiert wird durch die entgegengesetzte elektrostatische Anziehung zwischen den ionisierten, einseitig elektrisch geladenen Metallatomen in der Flüssigkeit und der entgegengesetzt geladenen zusammenhängenden Metallmasse, d. h. der entgegengesetzt wirkenden elektrischen Verschiebung mit dem Potentialsprung in der „Doppelschicht". Sind also soviel Metallatome in der das Metall umgebenden Flüssigkeit gelöst, dass die durch beiderseitige elektrostatische Ladung geweckten Kräfte jenem chemischen Fallbestreben das Gleichgewicht halten, so tritt elektrochemisches Gleichgewicht, d. h. Aufhören der Lösung von Metall ein. Nach den Ausführungen von Helmholtz hätte man sich zwischen Metall und Flüssigkeit eine — allerdings ausserordentlich dünne und voraussichtlich nur Millionstel Millimeter betragende (vgl. Wk. III a, 111 oder Wied. Ann. 7, 337) — „Doppelschicht" vorzustellen, welche der dielektrischen Trennungsschicht bei einem Kondensator entspräche (vgl. Hülfsvorstellungen, Fig. 7 bis 10). Metall *M* und Flüssigkeit *F* (Fig. 31) würden hiernach den beiden Belegungen, die strichliert angedeutete „Doppelschicht" dem Dielektrikum entsprechen.

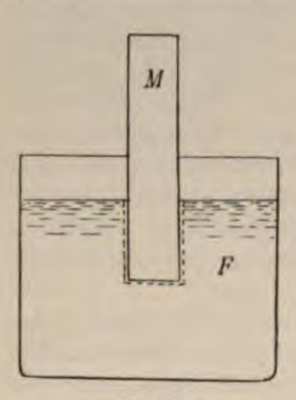


Fig. 31.

Das Vorhandensein einer Kombination von Leitern erster und zweiter Klasse (Metallen und Elektrolyten), sowie eines aussen geschlossenen Leiterkreises bieten die Möglichkeit dem elektrischen Druck nachzugeben, d. h. zu einem elektrischen Ausgleich (nämlich der elektrischen Ladung) in Richtung des resultierenden elektrischen Verschiebungsdruckes, das ist der resultierenden EMK. Sie bilden sonach die Vorbedingungen für den elektrischen Strom und vom energetischen Standpunkt für die Umwandlung von chemischer Energie, oder noch richtiger der bereits in elektrostatische Spannungsenergie (vgl. bei Fig. 31) übergegangenen chemischen Energie in die nächst tiefere Energiestufe der elektromagnetischen Energie mit all ihren Begleit- und Folgeerscheinungen. Die letzteren sind jedoch zusammen mit den zugehörigen Vorgängen im Elektrolyten näher bei den elektrischen Ausgleichvorgängen zu behandeln (vgl. H. I, 2 in **140** u. ff.). Hier wo es sich zunächst nur um die Erregung elektrischer Spannung durch Berührung der Leiter handelt, bildet die

Erklärung bezw. die Entwickelung der Vorstellung über die Entstehung der elektrischen Spannung den Abschluss, doch sind die bisherigen Betrachtungen noch zu vervollständigen.

Da die Jonen mit relativ sehr grossen Elektrizitätsmengen (elektrostatisch gemessen) behaftet sind, so tritt für den Fall, dass Metall nicht in seine eigene Salzlösung, sondern z. B. in Wasser getaucht wird, sehr rasch jener Gleichgewichtszustand ein, indem eine mit der Wage nicht nachzuweisende Menge von Metallatomen in Lösung geht oder ionisiert wird und dadurch die Lösung positiv elektrisch macht, während das Metall negativ wird. Bei völlig reinem Wasser würde also die Spannung der „Doppelschicht" (vgl. Hülfsvorstellungen), das ist die Grösse der Spannung zwischen Metall und Wasser nur von jenem elektrolytischen Lösungsdruck abhängen. Haben wir aber das Metall in seiner eigenen Salzlösung — eine solche stellt streng genommen auch Wasser nach Lösung der geringsten Metallspuren dar — so kommt noch ein weiteres die endgiltige Spannung bedingendes Moment hinzu. Die in der Lösung schon vorhandenen Metallionen üben je nach ihrer Anzahl in der Volumeinheit der Lösung einen dem elektrolytischen Lösungsdruck D entgegengesetzten Druck (sog. osmotischen Druck d) aus, welcher die weitere Lösung zu verhindern sucht, so dass je nach Konzentration der Salzlösung der elektrolytische Lösungsdruck D grösser, gleich und kleiner als jener osmotische Druck d sein kann. Dieses Verhältnis $\frac{D}{d}$ wird offenbar die Spannung zwischen Metall und seiner Salzlösung nicht nur in der Grösse, sondern auch im Vorzeichen bedingen. Ist

$$D > d,$$

wie z. B. bei allen sogenannten unedlen Metallen (Zn, Ni, Fe) in ihren Salzlösungen, gleichviel welcher Konzentration, also auch bei der stärksten, welche die Löslichkeit jener Salze zulässt, so sind stets eine Anzahl Metallatome ionisiert und dadurch eine entgegengesetzte elektrostatische Ladung von Flüssigkeit (positiv) und Metall (am nicht eingetauchten Ende negativ) herbeigeführt. Ist durch die fortschreitende Lösung von Metallatomen eine so starke elektrostatische Gegenkraft geschaffen, dass — abhängig von der Dicke der „Doppelschicht", das ist der bei jenem elektrochemischen Austausch- und Gleichgewichtsprozess beteiligten obersten Metallhaut, vgl. weiter unten — diese geweckte elektrische Anziehungskraft, welcher jener chemischen Kraft des Lösungsdruckes D entgegenwirkt, die Differenz $D - d$ kompensiert, so ist das elektrochemische Gleichgewicht herbeigeführt.

Für den Spezialfall, dass

$$D = d$$

wird weder Metall gelöst noch niedergeschlagen, d. h. die elektrischen Ladungen und elektrostatischen Kräfte treten nicht ins Spiel; Lösung und Metall sind bei osmotischem Gleichgewicht in elektrischer Beziehung gleichsam indifferent, so dass zwischen ihnen weder „Doppelschicht" noch Spannung vorhanden ist.

Für alle Fälle, wo

$$D < d,$$

wie z. B. bei den sogenannten edlen Metallen (Ag, Hg) in konzentrierteren Salzlösungen, findet in allen Beziehungen eine Umkehrung gegenüber dem

ersten Fall statt: An Stelle der mit Jonisierung verbundenen Lösung, welche als „Oxydation" oder wässrige Verbrennung aufzufassen ist, tritt eine als „Reduktion" aufzufassende Ausscheidung bezw. Überführung einiger vorher ionisierter Metallatome der Lösung in den unelektrischen, elementaren Zustand durch Niederschlag auf das eingetauchte Metall. Hierbei wird eine umgekehrte elektrostatische Ladung, d. h. Lösung negativ gegen Metall am äusseren Ende positiv herbeigeführt, bis wiederum elektrochemisches Gleichgewicht besteht, doch ist diesmal die elektrostatische Kraft entgegen dem osmotischen Druck d und im Sinne des Lösungsdruckes D gerichtet.

84. **Lösungstheorie und wahre Berührungsspannung.**

Auf Grund energetischer Betrachtungen, ähnlich denjenigen in der Wärmetheorie lässt sich nun mit Hülfe des elektrolytischen Lösungsdruckes D die auftretende elektrische Spannung zwischen Metall und Flüssigkeit berechnen, wenn man die bedeutungsvolle Erweiterung des Avogadroschen Satzes von den Gasen auf die Lösungen nach J. H. van't Hoff benutzt, welcher die Erkenntnis der Wesensgleichheit des osmotischen Druckes mit dem Gasdruck in folgendem Satz aussprach (Zeitschrift für physikalische Chemie 1887, Bd. I, vgl. hierzu auch **36**): „Bei gleichem osmotischen Druck und gleicher Temperatur enthalten gleiche Volumen der verschiedensten Lösungen gleiche Molekülzahl und zwar diejenige, welche bei derselben Spannkraft und Temperatur im selben Volum eines Gases enthalten ist". Diesen osmotischen Druck kann man bei Anwendung von halbdurchlässigen Membranen, d. h. solchen, welche das Lösungsmittel, aber nicht die gelösten Salze durchlassen, experimentell nachweisen, wobei alsdann das dem Gas entsprechende Bestreben der gelösten Salzmolekeln zu weiterer Verdünnung bezw. ihrer Jonen sich in mehr Lösungsflüssigkeit auszudehnen, sich als Flächendruck in kg auf den qcm ausdrücken lässt. Die Regel für das Verhalten der Gase wird bekanntlich durch die Zustandsgleichung $p \cdot v = R \cdot T$ dargestellt, wenn v das Volum (z. B. in ccm von einer Grammmolekel des Gases) unter dem Druck p (z. B. in Gramm pro qcm) bedeutet, T die absolute Temperatur (z. B. in Celsiusgraden) und R den für alle (idealen) Gasen gemeinschaftlichen Arbeitswert. Für die obigen Einheiten ($g \times$ cm) des CGS-Systems besitzt R den Wert 84 700 oder in (kleinen) Grammkalorien (0·428 kg $\times$ m) den Wert

$$\frac{84\,700}{42\,800} = 1{\cdot}98 \text{ g-cal bezw. } 4{\cdot}2 \,.\, 1{\cdot}98 = 8{\cdot}31 \text{ Joule,}$$

wenn elektrisch in Joule = Volt $\times$ Coulomb = Watt $\times$ Sekunde ausgedrückt.

Nach der Wärmetheorie ist die zur Umsetzung gelangende mechanische Arbeit A (gemessen z. B. in kg $\times$ m) bei Überführung eines (idealen) Gases vom Druck p_1 auf den Druck p_2

$$A = R \cdot T \cdot ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right),$$

sonach hier bei Überführung eines chemisch (einwertigen) Stoffes z. B. Metalles vom Lösungsdruck D auf den osmotischen Druck d

$$A = R \cdot T \cdot ln\left(\frac{D}{d}\right).$$

Andererseits muss nach der Energiegleichung A der elektrischen Arbeit entsprechen, gemessen durch das Produkt $E \cdot \varepsilon_0$, wenn E die Spannung (Potentialsprung) in der „Doppelschicht", z. B. zwischen Metall und Lösung, gemessen in Volt, und ε_0 die Elektrizitätsmenge, welche an die Jonen geknüpft ist, gemessen in Coulomb. Hieraus folgt die auftretende Spannung

$$E = \frac{R \cdot T}{\varepsilon_0} \cdot ln\left(\frac{D}{d}\right).$$

Mit jedem Grammion gehen nun bei chemischer Einwertigkeit des Stoffes nach dem Gesetz von FARADAY $\varepsilon_0 = 96\,540$ Coulomb über, bei m-facher Wertigkeit $m \cdot 96\,540$ Coulomb (vgl. **25**), sonach folgt die Spannung in Volt

$$E \text{ in Volt} = \frac{8{\cdot}31}{m\,.\,96\,540} \cdot T \cdot ln\left(\frac{D}{d}\right)$$

oder für BRIGGsche Logarithmen und $T = 288$, das ist $+ 15^0$ C. wäre

$$E\,(\text{Volt}) = \frac{0{\cdot}0571}{m}\; log\left(\frac{D}{d}\right).$$

Diese Formel für die Grösse der Berührungsspannung kann als grundlegend für die elektrochemischen Beziehungen angesehen werden; sie liefert aber zunächst nur eine Einzelspannung zwischen Metall und seiner Lösung. Jedes sogenannte Element stellt aber eine Leiterkombination von mindestens drei, häufig vier oder noch mehr verschiedenen Leitern vor, so dass die EMK des Elementes sich erst als die algebraische Summe aller dieser Teilspannungen ergiebt; für die meisten sogenannten „konstanten" Elemente mit je zwei Metallen und Elektrolyten wäre sonach zu unterscheiden

a) Spannung zwischen den beiden Metallen I und II
b) „ „ „ „ Flüssigkeiten I und II
c) „ „ Metall I und seiner Flüssigkeit I
d) „ „ „ II „ „ „ II.

Zu a) wäre zu bemerken, dass die oben angeführten Spannungswerte für die Berührungsspannung zwischen Metallen (vgl. **82**, Tab. IV) durchaus nicht die eigentlichen Berührungsspannungen der Metalle sind, sondern bereits Kombinationsspannungen zwischen den Metallen und ihren Oberflächenhäuten, welche Feuchtigkeitsspuren, ferner kondensierte, also von der umgebenden Atmosphäre abhängige Gase enthalten u. s. f. Die eigentlichen Berührungsspannungen sind viel kleiner und aus thermoelektrischen Überlegungen und Beobachtungen (siehe **96**) ermittelt worden (vgl. hierzu auch **25** am Schluss). Nach solchen von LE ROUX ausgeführten thermoelektrischen Versuchen würden die wahren Berührungsspannungen gegen Kupfer etwa folgende Grössen in Danielleinheiten haben, so dass die Zahlenwerte für die jetzt üblichen technischen Einheiten in Volt etwa $10\,^0/_0$ grösser wären (vgl. OSTWALD, 970).

Wahre Berührungsspannungen gegen Kupfer in Daniell-Einheiten:

Legierung Sb Cd mit 20 Prozent Wismut	0·0149
Antimon des Handels	0·0055
Eisen	0·0028
Kadmium	0·00055
Zink	0·0004
Neusilber	— 0·0027
Reines Wismut	— 0·0218
Wismut mit 10 Prozent Antimon	— 0·0294

Die Werte sind sonach in fast allen Fällen vernachlässigbar klein gegenüber den resultierenden Spannungen der Elemente.

Für die oben unter b) bis d) aufgeführten Teilspannungen wären zwei Fälle zunächst zu unterscheiden: Leiterzusammenstellungen zu „Elementen" oder Ketten, bei denen Metall I und II das gleiche ist und die beiden Lösungen I und II dementsprechend auch gleichartig, jedoch hinsichtlich der Konzentration verschieden sind, das sind die sogenannten Konzentrationsketten; ferner Leiterzusammenstellungen mit zwei verschiedenen Metallen und zugehörigen Flüssigkeiten. Bei den Konzentrationsketten wäre sogleich zu bemerken, dass bei etwaigem Vorhandensein von Jonen eines anderen Metalls in der Lösung für die Betrachtung des Spannungswertes nur die Jonen des Hauptmetalles in Frage kommen.

Ausserdem ist aber im allgemeinen noch die namentlich energetisch wichtige Einteilung in umkehrbare und nichtumkehrbare (polarisierbare) Primärelemente zu unterscheiden. Unter umkehrbaren versteht man solche, wie z. B. das Daniellelement, mit zwei Metallen, von denen jedes in seiner zugehörigen Salzlösung sich befindet. Beim Arbeiten auf einen Stromkreis wird hierbei das positivere oder leichter oxydierbare (verbrennbare) Metall (Zink) unter Jonisierung ($D_1 > d_1$, sonach an den freien Enden, d. h. beim Metall an der sogenannten „Klemme" Flüssigkeit +, Metall —) gelöst (oxydiert, verbrannt); das schwerer oxydierbare Metall (Kupfer) wird hingegen unter Entionisierung (Reduzierung zu unelektrischem Metall) niedergeschlagen, wozu nur nötig, dass $D_2 - d_2$ einen kleineren positiven Wert besitzt als das andere Paar (oben Zink und Zinkvitriollösung oder anfänglich verdünnter Schwefelsäure), während für $D_2 - d_2 = o$ oder negativ die resultierende Spannung des Elements immer grösser wird. Wird jedoch durch Gegenschaltung einer grösseren Spannung die Stromrichtung umgekehrt, so tritt unter Zuführung elektrischer Energie von aussen und Umwandlung derselben in chemische Energie, ähnlich wie bei der Ladung eines Akkumulators, der umgekehrte Vorgang ein, z. B. beim Daniell: Lösung von Kupfer und Ausscheidung von Zink, also die Möglichkeit der Rückwärtsladung als Sekundärelement. Nichtumkehrbare Primärelemente sind hingegen solche Zusammenstellungen, wie z. B. das Leclanché, oder um eines mit zwei verschiedenen Metallen anzuführen, das Zink-Silber-Element mit verdünnter Schwefelsäure, bei welchen ein Niederschlagen des edleren Metalles (im Sinne von schwerer oxydierbar oder verbrennlich) aus der Lösung unmöglich und deshalb eine Entionisierung des in der Lösung dissoziierten (einseitig elektrisch geladenen) Wasserstoffes zu gasförmigem Wasserstoff eintritt; letzterer wird also ohne einseitige elekrische Ladung an der Ableitungselektrode (Silber) ausgeschie-

den. Wird der Wasserstoff nicht durch Okklusion, wie z. B. besonders stark bei Platinelektroden festgehalten, so vernichtet dieses gasförmige Entweichen eines Produktes des elektrolytischen Leitungsvorganges die Umkehrbarkeit des Prozesses. Gleichzeitig wird beim Arbeiten als Primärelement durch die hervorgerufene Gaspolarisation an der Ableitungselektrode die resultierende Spannung des Primärelements geändert und damit die von ihr nach OHMS Gesetz erzeugte Stromstärke bei sonst konstant bleibendem Stromkreis „inkonstant".

85. Wahre Berührungsspannungen zwischen Metallen und Flüssigkeiten.

Die „Konzentrationsketten" lassen nun unter Benutzung der oben abgeleiteten Fundamentalformel (vgl **84**), welche für Leiterzusammenstellungen zu umkehrbaren Primärelementen direkt benutzbar ist, eine allgemeine Formulierung der Spannung des Primärelementes zu. Besteht z. B. die Zusammenstellung aus Silber in konzentrierter Silbernitratlösung und Silber in verdünnter Silbernitratlösung, wobei die beiden Lösungen, durch Schichtung, poröse Scheidewand, Heberverbindung oder dergleichen in leitender Verbindung stehen, doch unter Erschwerung einer mechanischen Mischung, so wird die verschiedene Jonenkonzentration der beiden Lösungen elektromotorisch wirken. Was zunächst die Richtung der resultierenden elektrischen Druckdifferenz (EMK) anlangt, so wird das Silber in der verdünnten Lösung die Rolle der Lösungselektrode (wie beim DANIELL oder LECLANCHÉ das Zink) spielen, indem infolge des geringeren osmotischen Gegendruckes der verdünnten Lösung gegenüber der konzentrierten ein Wanderungsbestreben der Silberionen und damit der „freien" positiven Elektrizität (Jonenladung) von der verdünnten zur konzentrierten Lösung stattfindet, verbunden mit Niederschlagung (Entionisierung) von Metall aus der letzteren auf die zugehörige Silberelektrode (Ableitungselektrode aussen +) und Auflösung der Elektrode (Jonisierung) in der verdünnten Lösung (Lösungselektrode aussen —). Obwohl in beiden Lösungen der elektrolytische Lösungsdruck D des Silbers kleiner sein kann als der osmotische Druck d, so wird doch $D - d$ in der konzentrierteren Lösung einen grösseren negativen Wert geben, als in der verdünnteren Lösung, d. h. die resultierende EMK (Spannung) und der Strom wird in der oben angegebenen Richtung verlaufen. Sind die osmotischen Drucke der beiden Lösungen d_1 und d_2, so wird bei der Gleichheit von D nach der elektrochemischen Grundformel die Spannung

$$E = \frac{R \cdot T}{m} \ln \frac{d_1}{d_2},$$

wenn man berücksichtigt, dass die Teilspannung a (vgl. **84**) zu Null wird wegen Gleichheit der Elektroden, und die Teilspannung b zwischen den beiden Flüssigkeiten zwar nicht Null aber praktisch so klein ist, dass sie vernachlässigt werden kann.

Über Prüfung bezw. Bestätigung der obigen Formel von NERNST bei Konzentrationsketten siehe NERNST, Z. f. ph. Ch. 1889, Bd. III, 129 oder LE BLANC, 137 u. ff.

Die Formel lässt gleichfalls eine Erweiterung auf Ketten mit gleichem Metall und verschiedenen Salzlösungen, d. h. verschiedenen Säureradikalen, ferner auf sogenannte Konzentrations-Doppelketten, z. B. Kalomelkette (vgl. Bd. III), endlich auf reine Flüssigkeitsketten zu, doch sei bezüglich dieser spezielleren mehr ins Gebiet der Elektrochemie reichenden und auch noch nicht völlig abgeschlossenen Betrachtungen auf die diesbezügliche Litteratur (WIED. II,

1381 bis 1409; OSTWALD, Allgem. Chemie II oder LE BLANC, 125 u. ff.) verwiesen. Anschliessende Betrachtungen siehe auch H. I, 2.

Was die experimentellen Messergebnisse der Einzelwerte von Berührungsspannungen anlangt, so ist schon darauf hingewiesen worden, dass alle älteren Beobachtungsverfahren, sowie die damit gewonnenen Werte als nicht einwurfsfrei angesehen werden müssen. Solche scheinen erst erreicht worden zu sein durch die Anwendung und Verbesserung der sogenannten Tropfelektroden, d. h. von schnell abtropfenden Quecksilbermassen, welche nach Versuchen von PASCHEN so über der Oberfläche der zu untersuchenden Flüssigkeit anzubringen sind, dass die Auflösung des ausfliessenden Quecksilberstrahles gerade an der letzteren beginnt. Alsdann besteht nach den Ausführungen von HELMHOLTZ (vgl. OSTWALD, 1034) über „Doppelschichten" keine Spannung zwischen dieser „Tropfelektrode" und der Flüssigkeit, wenn jene richtig so eingestellt ist, dass die unten abtropfende Quecksilbermenge als Zuleitung anzusehen ist, die nicht fälscht, d. h. keine weitere unsichere Berührungs-

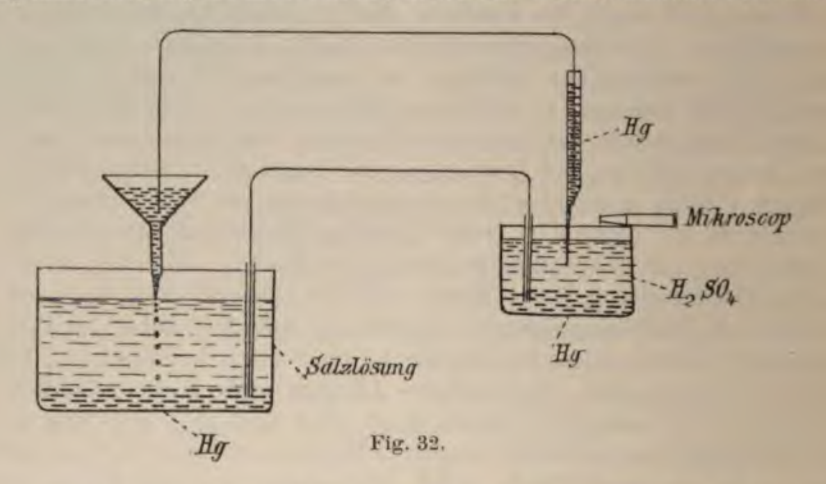


Fig. 32.

spannung einführt (vgl. **83**). Zuerst von W. OSTWALD weiter ausgebildet und endlich von PASCHEN wesentlich vervollkommnet (vgl. WIED. Ann. 41, 801 u. 899), gestattet diese einwurfsfreie metallische Zuleitung zu der Flüssigkeit, welche auf Berührungsspannung untersucht werden soll, die direkte Messung der Spannung, zunächst von Salzlösungen gegen Quecksilber. Das abgetropfte Quecksilber, welches mit der untersuchten Salzlösung dauernd in Berührung steht, wird als die eine Elektrode benutzt, das abtropfende als die andere und beide an ein Elektrometer, am besten, wie in Fig. 32 schematisch angedeutet, ein Kapillarelektrometer von LIPPMANN (vgl. **40** sowie **83**) angeschlossen. Durch Anwendung von Amalgamen an Stelle des Quecksilbers misst man ferner so die Spannung der Salzlösungen gegen das im Quecksilber aufgelöste Metall. Durch Anwendung zweier solcher „Tropfelektroden" bestimmt man die Berührungsspannung zweier verschiedener Flüssigkeiten bezw. zweier verschiedener Konzentrationen derselben Salzlösung und endlich als Differenzmessung, d. h. indirekt auch diejenige zwischen zwei Metallen. Über Vorsichtsmassregeln bei Ausführung solcher Messungen, sowie geäusserte Bedenken gegen die Anordnung vgl. WIED. II., 1087—1104. Nach Messungen von PASCHEN (vgl. Wk. III a, 126) wäre in Danielleinheiten (D) ausgedrückt (Werte in Volt sonach etwa 10% grösser), z. B.:

+ Hg gegen HCl —

spez. Gew. u. Temp. d. Lösung	1·010 (18°)	1·015 (18°)	1·038 (17°)	1·082 (16°)	1·121 (19°)
Spannung in D	0·511	0·515	0·520	0·548	0·578

+ Hg gegen H_2SO_4 —

spez. Gewicht und Temp. der Lösung .	1·006 (18°)	1·105 (16°)	1·123 (17°)	1·170 (16°)
Spannung in D	0·696	0·792	0·816	0·859
spez. Gewicht und Temp. der Lösung .	1·190 (20°)	1·297 (25°)	1·580 (30°)	1·846
Spannung in D	0·871	0·950	1·141	1·341

Hiernach wächst die Spannung mit der Konzentration der Lösung. Werte, soweit sie nicht genau bezüglich der Konzentration (und ungefähren Temperatur) der Lösungen ermittelt wurden, besitzen daher keine allgemeinere Bedeutung. Diese Art der Spannungsmessung schliesst die Lösung des ein Jahrhundert schwer umkämpften VOLTAschen Problems ein und liefert die praktisch fast allein in Frage kommenden Berührungsspannungen zwischen Metall und Flüssigkeit, denen gegenüber die Spannungen zwischen Metallen (vgl. 84 bei a) unter sich, ebenso wie die zwischen Flüssigkeiten unter sich (b) ganz untergeordnet erscheinen. Für die wichtigeren Metalle und ihre normalen Salzlösungen (1 Äquivalentgewicht des festen Elektrolyten gelöst in 1 Liter Wasser) bezw. wo dies nicht möglich mit den gesättigten Salzlösungen, liefert diese Messung nach NEUMANN (vgl. 1894 Zeitschr. ph. Chem. XIV, 229 bezw. LE BLANC, 183) etwa folgende absoluten Werte (in Volt) als Berührungsspannungen:

Berührungsspannungen in Volt zwischen Metallen und ihren normalen Salzlösungen

Metall	Sulfat	Chlorid	Nitrat	Acetat
Magnesium	+ 1,239	+ 1,231	+ 1.060	+ 1,240
Aluminium	+ 1,040	+ 1,015	+ 0,775	
Mangan	+ 0,815	+ 0,824	+ 0,560	
Zink	+ 0.524	+ 0,503	+ 0,473	+ 0,522
Kadmium	+ 0.162	+ 0,174	+ 0,122	
Thallium	+ 0.114	+ 0,151	+ 0.112	
Eisen	+ 0,093	+ 0,087		
Kobalt	— 0,019	— 0,015	— 0,078	— 0,004
Nickel	— 0.022	— 0.020	— 0,060	
Blei		— 0.095	— 0.115	— 0,079
Wasserstoff	— 0.238	— 0,249		— 0,150
Wismut	— 0,490	0,315	— 0,500	
Arsen		0,550		
Antimon		— 0,376		
Zinn		0,085		
Kupfer	— 0.515		0,615	0,580
Quecksilber	0,980		1,028	
Silber	0.974		1,055	— 0,991
Palladium		1,066		
Platin		1,140		
Gold		1,356		

Diese absoluten Spannungswerte würden jetzt auch die Berechnung der absoluten Lösungsdrucke in kg pro qcm (Atmosphären) mit Hülfe der oben gegebenen Grundformel

$$E = \frac{0{\cdot}0571}{m} \log \frac{D}{d}$$

gestatten. Setzt man den osmotischen Druck in ganz dissociierten normalen Lösungen zu 22 kg pro qcm (vgl. WIED. II, 1410), so ergaben die obigen Werte von NEUMANN für den elektrolytischen Lösungsdruck der wichtigeren Metalle in kg pro qcm oder Atmosphären (vgl. LE BLANC, 185):

Zink	Kadmium	Eisen	Kobalt	Nickel	Blei
$(9{\cdot}9)\,10^{18}$	$(2{\cdot}7)\,10^{6}$	$(1{\cdot}2)\,10^{4}$	$(1{\cdot}9)$	$(1{\cdot}3)$	$1{\cdot}1)\,10^{-3}$

Wasserstoff	Kupfer	Quecksilber	Silber
$(9{\cdot}9)\,10^{-4}$	$(4{\cdot}8)\,10^{-20}$	$(1{\cdot}1)\,10^{-16}$	$(2{\cdot}3)\,10^{-17}$

Bei dieser gleichsam „absoluten“ Spannungsreihe schlägt jedes voranstehende Metall in die Salzlösung einer der folgenden getaucht das letztere nieder oder entwickelt Wasserstoff, während es selbst in Lösung geht.

Für die Berührungsspannungen zwischen Flüssigkeiten seien die unten folgenden von NERNST bestimmten Werte als Beispiel angegeben und nebenbei die berechneten Werte, wie sie die von ihm aufgestellte Formel ergiebt. Letztere gründet sich auf den Satz: Die ungleiche Wandergeschwindigkeit der Jonen ist die Ursache für das Auftreten einer elektrischen Spannung an der Berührungsstelle zweier Lösungen; dieser wird zunächst auf Lösungen desselben Salzes, aber verschiedener Konzentrationen als den einfachsten Fall angewendet; weiterhin mit Hülfe eines Superpositions-Prinzips auch auf andere Zusammenstellungen. Aus dieser Formel für 15° C. (vgl. hierzu oben)

$$E\text{ (in Volt)} = \frac{0{\cdot}0571}{m} \cdot \frac{u-v}{u+v} \log \frac{D}{d},$$

wenn u und v die Wandergeschwindigkeiten der Jonen ausdrücken, folgt, dass E einmal von der spezifischen Anzahl der „freien“ Jonen (Dissoziationsgrad der Lösung), ein zweites Mal von ihrer Beweglichkeit (Leitfähigkeit vgl. H. I, 2) abhängt. Sind beide in zwei Lösungen praktisch gleich, wie z. B. zwischen äquivalenten Lösungen von Zinksulfat und Kupfersulfat, so kann hiernach keine Spannung zwischen ihnen auftreten. In anderen Fällen ergab sich zwischen Lösungen mit je 0·1 Gramm-Molekül Salz in 1 Liter Lösung (vgl. WIED. II, 1396):

	HCl | KCl	HCl | NaCl	HCl | LiCl	KCl | NaCl	KCl LiCl	NaCl LiCl
Beobachtet	+ 0·0285	+ 0·035	+ 0·040	+ 0·0040	+ 0·0069	+ 0·0027
Berechnet	+ 0·0282	+ 0·0334	+ 0·0358	+ 0·0052	+ 0·0077	+ 0·0024

86. Temperaturkoeffizient der Spannung und energetische Beziehungen.

Wie schon oben angedeutet, ist die Temperatur auf die Spannung zwischen Leiter und Elektrolyt von Einfluss und der Temperaturkoefficient, d. h. die Änderung der Spannung bei Steigerung der Temperatur ist gerade für die Theorie der EMK bei galvanischen Zusammenstellungen von der grössten Bedeutung geworden. Durch unrichtige, weil einseitige Übertragung

des Energieprinzips oder der zuerst für die Umwandlung von Wärme und mechanischer Arbeit aufgestellten Energiegleichung auf die elektrochemischen Erscheinungen (vgl. 84), war nach dem Vorgang von THOMSON die Ansicht längere Zeit herrschend geworden, dass die Wärmetönung unmittelbar eine Berechnung der EMK gestatten müsse. Dadurch, dass man bei einem chemischen Verbindungsprozess die chemisch verfügbare Wärme $U = n \cdot U_1$, welche für das Äquivalentgewicht ($n = 1$) als „Wärmetönung" (U_1) bezeichnet und bei Wärmeabgabe mit $+$, bei Wärmeabsorption mit $-$ eingeführt wird, ohne weiteres gleich der galvanischen Wärme ($E \cdot J \cdot t$) des Elements setzte, liess sich mit Hülfe des Gesetzes von FARADAY, wonach $n = c_1 \cdot J \cdot t$, die auftretende Spannung als

$$E = U_1 \cdot c_2$$

nur als Funktion der Wärmetönung U_1 darstellen, wenn c_2 einen Zahlenfaktor enthält, der, wie stets bei Energiegleichungen, abhängig von den benutzten Masseinheiten auch diese allein wiederum beeinflusst. Für Primärelemente ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung, wie dies zufällig beim DANIELL nahezu zutrifft, stimmt auch diese Ableitung von E aus U_1 angenähert, bei allen anderen jedoch, welche beim Arbeiten entweder Wärme nach aussen abgeben, d. h. sich erwärmen, oder aus der Umgebung Wärme aufnehmen, d. h. sich abkühlen, stimmt sie ganz und gar nicht. Nachdem (1876—78) zuerst GIBBS[1]) in den seiner Zeit so gut wie unbemerkt gebliebenen umfassenden energetischen Gleichungen den richtigen Zusammenhang gegeben hatte, wurde unabhängig durch H. HELMHOLTZ, nachdem auch er sich durch jene unrichtige Auffassung hindurchgerungen, die Formel (im Jahre 1882) abgeleitet, welche dem Einfluss des Wärmeaustausches zwischen Primärelement und Umgebung gerecht wurde; dieselbe enthält den theoretisch sehr wichtigen Zusammenhang zwischen dem Temperaturkoeffizienten der EMK und der Energiedifferenz aus dem chemisch verfügbaren, das ist durch die Wärmetönung gemessenen Energiebetrag und dem über die elektrische Energieform herabsinkenden Energiebetrag, der also in Form von elektrischer Energie nach Belieben verwendbar wird. In Analogie mit den von CARNOT angestellten Betrachtungen über wärmemechanische Kreisprozesse, nahm HELMHOLTZ die formelmässige Verfolgung eines energetischen Kreislaufes für diese Energiedifferenz Q vor, welche den Wärmeaustausch mit der Umgebung charakterisiert. Hieraus leitet er die Gleichung

$$Q = \varepsilon \cdot T \cdot \frac{dE}{dT}$$

ab, wenn T die absolute Temperatur, ε die von dem Primärelement gelieferte Elektrizitätsmenge und $\frac{dE}{dT}$ der Temperaturkoeffizient seiner mit E bezeichneten EMK. Durch Division mit der Zeit t würde links die Wärmeleistung $\frac{Q}{t}$ und rechts die Stromstärke $J = \frac{E}{t}$ in die Gleichung eintreten. Das Vorzeichen von $\frac{dE}{dT}$ wird also angeben, ob Q negativ oder

1) Übersetzt als thermodynamische Studien, Leipzig, 1892.

positiv, d. h. ob das Primärelement sich beim Arbeiten erwärmt, also die Wärme Q an die Umgebung abgiebt und aus chemischer Energie direkt in Wärmeenergie verwandelt, oder ob das Primärelement sich unter die Umgebung abkühlt und den Wärmebetrag aus der Umgebung aufnimmt, also ausser der chemischen Wärmetönungsenergie auch noch Wärmeenergie der Umgebung in die elektrische Energieform überführt. Diese Wärmemenge Q, welche das Primärelement zur Konstanthaltung seiner Temperatur T beim Arbeiten benötigt, wird wohl auch als „lokale" Wärme bezeichnet. Bei $\frac{dE}{dT}$ negativ ist also der Energiebetrag, welcher bei der Umsetzung seinen Weg über die elektrische Energieform nimmt, kleiner als die für die unmittelbare Wärmetönung in Betracht kommende chemische Energie, hingegen grösser bei $\frac{dE}{dT}$ positiv (näheres vgl. WIED. II, 1538 u. ff.).

Um das Verständnis des Zusammenhanges der verschiedenen Energieglieder bei diesen thermochemischen Vorgängen zu erleichtern, sei auf folgende von LUGGIN (vgl. Ph. Z. I, 362) herrührende mechanische Hülfsvorstellung nebst graphischer Behandlung hingewiesen. Fig. 33 stellt ein mechanisches System vor, bei welchem der Kolben mit dem geschlossenen Ende durch eine auf Druck oder Zug beanspruchte Spiralfeder verbunden ist. Diese Feder beeinflusse neben der Verschiedenheit der Gasdrucke in A und B die Bewegungen des Kolbens, oder energetisch treffender seine Arbeitsfähigkeit. Die umkehrbare Arbeitsleistung der Feder — bei ihrer Entspannung beziehungsweise Spannung — sei unabhängig von der Temperatur, hänge also nur ab von der Änderung ihrer inneren Energie U_1; sie entspricht der „Wärmetönung" bei den chemoelektrischen Prozessen, wenn der Ablauf der Verwandlung ohne Arbeitsleistung in anderer Form erfolgt, und wird auch als Wärmetönung bei konstantem Volumen bezeichnet. Dieselbe bildet nur das eine Glied der Arbeitsfähigkeit des Systems bei konstanter Temperatur. Das zweite von der absoluten Temperatur abhängige Glied wird im obigem Modell durch den Gasüberdruck von A dargestellt. Diese im kalorischen Mass gemessene Arbeitsleistung q kann also durch die Gleichung

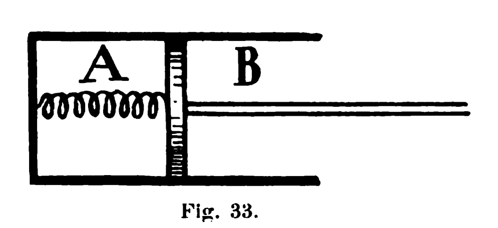


Fig. 33.

$$q = \eta \cdot T$$

dargestellt werden, wenn η die als Entropie bezeichnete charakteristische Konstante ausdrückt. Die gesamte gewöhnlich als „freie Energie" (vgl. hierzu 83) bezeichnete Arbeitsfähigkeit A des Systems bei konstanter Temperatur ist also durch die Gleichung

$$A = U_1 + q$$

gegeben.

Wird diese „freie Energie" A als Abscisse, die Temperatur T als Ordinate aufgetragen, so stellt Fig. 34 die Verhältnisse graphisch dar für den Fall, dass U_1 und q positives Vorzeichen besitzen und die strichlierte Linie den Nullwert der Abscisse bezeichnet. Dies würde in Fig. 33 etwa gedrückter

Feder und Überdruck von A gegen B infolge Temperaturerhöhung entsprechen. Die übrigen drei möglichen Kombinationen sind hiernach in ihrer graphischen Darstellung leicht zu übersehen. Die geneigte Entropielinie schneidet also für T bezw. q gleich Null die Abscisse im Fusspunkt der Vertikalen, welche die innere Energie (U_1) angiebt, d. h. für Fig. 33: die Arbeitsfähigkeit A ist **nur** durch die Federspannung bedingt, oder

$$A = U_1.$$

Fig. 34 liefert ohne weiteres die Formulierung des zweiten Hauptsatzes der Wärmetheorie

$$\eta = \frac{q}{T} = \frac{A - U_1}{T} = \frac{dA}{dT}$$

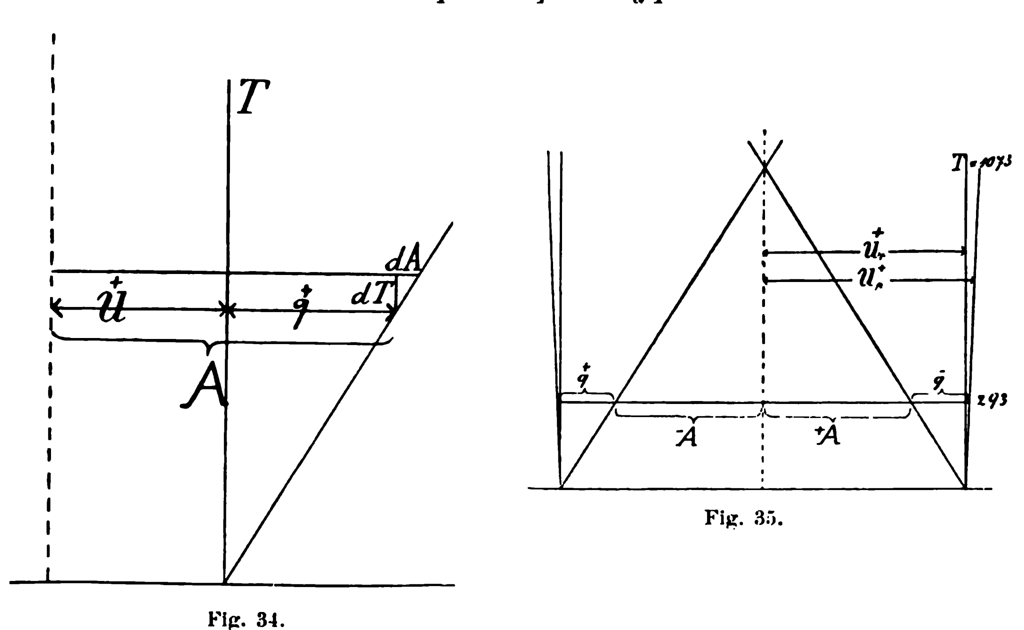


Fig. 34.

Fig. 35.

und ebenso bei Ausführung eines Kreisprozesses bei den Temperaturen $T + dT$ und T für q (vgl. oben) längs der oberen Isotherme den Wert $\eta \cdot (T + dT)$, längs der unteren $\eta \cdot T$; sonach für die Mehrarbeit dA

$$dA = \eta \cdot dT = q \cdot \frac{dT}{T}.$$

Bei Messung der Arbeit A für das Grammäquivalent in cal. statt in Watt folgt aus der Beziehung zwischen der EMK E und A (vgl. 84), das ist

$$E = \frac{A}{0{\cdot}24 \,.\, 96540} = \frac{A}{23110}$$

für den zweiten Hauptsatz

$$23110 \frac{dE}{dT} = \frac{23110\, E - U_1}{T},$$

wenn U_1 die Wärmetönung für 1 gr Äquivalent bezeichnet.

Hieraus folgt ohne weiteres die allgemeine Formel für die EMK

$$E = \frac{U_1}{23\,110} + T \cdot \frac{dE}{dT} \text{ (HELMHOLTZsche Formel)}$$

oder bei fehlendem Wärmeaustausch mit der Umgebung, das ist $q = 0$ der Spezialfall

$$E = \frac{U_1}{23\,110} \text{ (THOMSONsche Regel).}$$

Mit Wärmeaustausch wird also bei Erwärmung des arbeitenden Elementes über die Umgebung, d. h. Abgabe von Wärme, die EMK E kleiner sein als der Wärmetönungswert, im umgekehrten Fall grösser. Das Diagramm und das Verhalten der EMK abhängig von T würde z. B. für die Gaskette: Sauerstoff — Wasserstoff (vgl. 18) durch Fig. 35 dargestellt sein. Als komplizierend tritt hier zunächst die Arbeit der Atmosphäre hinzu, welche für die Vereinigung von 1 Äquivalent Wasserstoffgas und $^1/_2$ Äquivalent Sauerstoffgas zu flüssigem Wasser die Arbeit $^3/_4\, R\, T$ leistet, das ist für 20° C. oder $T = 293$ die Arbeit von 440 cal., so dass die Wärmetönung bei konstantem Druck $U_p = 34\,200$ cal. sich von der Wärmetönung bei konstantem Volumen $U_v = 33\,760$ cal. unterscheidet und je zwei Wärmetönungsgrade auf beiden Seiten des Diagramms bedingt, dessen rechte Hälfte — von der strichlierten Nulllinie gerechnet — die Wasserbildung darstellt, die linke den entgegengesetzten Vorgang der Wasserzerlegung. Nach der THOMSONschen Regel würde die EMK

$$E = \frac{34\,200}{23\,110} = 1{\cdot}480 \text{ Volt}$$

folgen, während man 1·062 Volt beobachtet hat. Die vom Element pro Äquivalent an die Umgebung abgegebene und durch ein Kalorimeter messbare Wärme musste sonach

$$-(1{\cdot}480 - 1{\cdot}062)\; 23\,110 = -0{\cdot}418 \cdot 23\,110 = -9660 \text{ cal.}$$

sein. Der beobachtete Temperaturkoeffizient ist $\frac{dE}{dT} = -0{\cdot}00\,142$, also für 20° C. wird

$$T \cdot \frac{dE}{dT} = -0{\cdot}416 \text{ oder } -0{\cdot}416 \cdot 23\,110 = 9614 \text{ cal.}$$

Die Entropielinien schneiden sich mit der strichlierten Nulllinie der freien Energie bei etwa $T = 1073$, das ist 800° C.

In weiterer Verfolgung dieser Betrachtungen und unter Benutzung der in ihrer Richtigkeit mehrfach bestätigten Gleichung von HELMHOLTZ (vgl. WIED. II, 1666) hat OSTWALD die sogenannten Jonisierungswärmen aus den experimentell ermittelten Spannungen berechnet, d. h. diejenigen Energiebeträge, welche erforderlich sind, um im arbeitenden Primärelement beim Lösungsprozess eines Metalles das letztere in Jonen, d. h. den einseitig elektrisch geladenen Zustand überzuführen. Er setzt zu diesem Zweck den messbaren Wärmeaustausch mit der Umgebung auf das Grammäquivalent bezogen

$$\varepsilon_0 \cdot T \cdot \frac{\delta E}{\delta T} = \varepsilon_0 \cdot E - i.$$

In dieser Zweiteilung auf der rechten Seite stellt also $\varepsilon_0 \cdot E$ die auf das Grammäquivalent ($\varepsilon_0 = 96540$ Coulomb) bezogene „Arbeitswärme“ vor, j die Jonisierungswärme. In einem Primärelement mit der sich praktisch aus den beiden Teilspannungen E_a an der Anode und E_k an der Kathode zusammensetzenden Gesamtspannung E (EMK) würde

$$E = E_a - E_k = \frac{j_a - j_k}{\varepsilon_0} + T \frac{\delta E_a - \delta E_k}{\delta T},$$

wobei $j_a - j_k$ gleich der Differenzwärme beim Lösen (Jonisieren) des einen Metalles, z. B. Zink im DANIELL und beim Niederschlagen (Entionisieren) des anderen, z. B. Kupfer ist. Bei m wertigen Kationen erhielte man

$$E = \frac{j_a - j_k}{m \cdot \varepsilon_0} + T \frac{\delta E_a - \delta E_k}{\delta T}.$$

So ist z. B. für Kupfer in normaler Lösung der Kupfersalze $m = 2$, $E = 0{\cdot}60$ Volt $\cdot \frac{\delta E}{\delta T} = 0{\cdot}00075$; also für $T = 290^0$ ($+ 17^0$ C.) $j = 17700$ g-cal. oder 177 OSTWALD-Cal. Nach OSTWALD würde man diese Überführung von 63·4 g metallischem (Cu) in Kupferionen (Cu^{II}) zu schreiben haben

$$Cu^{II} = Cu + 177 \text{ Cal.}$$

Für Zink wäre $E = - 0{\cdot}51$ Volt $\cdot \frac{\delta E}{\delta T} = 0{\cdot}0075$ also $j = - 331$ Cal.

Die Differenzwärme 177 + 331 = 508 Cal. müsste also der Wärmetönung bei Ausfällung des Kupfers aus seinen Salzlösungen durch Zink entsprechen, welche zu 501 Cal. experimentell ermittelt wurde.

Die Jonisierungswärme für je eine Valenz bei vollständiger Dissoziation und Lösung in Wasser wäre in ähnlicher Weise ermittelt nach OSTWALD (vgl. WIED. II, 1411) in Cal.:

H	K	Na	Li	Sr	Ca	Mg	Al	Mn	Fe''	Fe'''	Co
5·5	612	565	622	580	538	536	394	242	101	— 121	76

Ni	Zn	Cd	Cu''	Cu'	Hg	Ag	Tl	Pb	Sn
70	166	83	— 89	— 170 (?)	— 207	— 264	8	— 7	17

Da die Jonisierungswärme des Wasserstoffes nur klein ist (5·5 Cal.), so ist die Jonisierungswärme der Metalle für jede Valenz sehr nahe gleich ihrer Lösungswärme in verdünnten Säuren, bezw. nur 5·5 Cal. kleiner.

87. Grenzdicken von elektrochemisch wirksamen Schichten.

Im Hinblick auf die von HELMHOLTZ entwickelte Auffassung der „Doppelschichten“ an den Grenzflächen von Metall und Elektrolyt mit Berührungsspannung bildet die Frage des Verhaltens dieser Spannung bei immer dünner werdenden Metallschichten ein gewisses Interesse, namentlich in molekulartheoretischer Hinsicht. Versuche von OBERBECK mit dünnen Metallhäuten, ebenso von SCHREBER mit leitenden Oxydhydratschichten ergaben beide, dass die Spannung bei Verminderung der Dicke bis zu einem Grenzwert

angenähert konstant bleibt, dann aber rasch abnimmt (vgl. Wk. IIIa, 129). Diese Grenzdicken in millionstel mm oder $\mu\mu$ wären

nach OBERBECK bei Zink 2·65, bei Kadmium 1·73 und bei Kupfer 0·63,
„ SCHREBER „ $Pb(OH)_4$ 4·8, bei $Mn(OH)_4$ 2·3 $\mu\mu$.

Für $Pb\,(OH)_4$ (Bleisuperoxydhydrat) wäre der Verlauf der Spannung E in beliebigen Einheiten abhängig von der Dicke in Fig. 36 dargestellt. (Weiteres über die Eigenschaften und Dicken von sogenannten „Übergangsschichten" siehe auch H. I, 2 in **216**.)

Mit der vorübergehenden Bildung von dünneren Oberflächenhäuten dürfte auch das Auftreten einer grossen Reihe von gelegentlich zu beobachtenden vorübergehenden Berührungsspannungen zusammenhängen, wie z. B. zwischen zwei Metallen bei ungleichzeitigem Eintauchen in dieselbe Flüssigkeit u. s. f. Auch hier ist ähnlich wie bei der gelegentlichen und unbeabsichtigten reibungs-

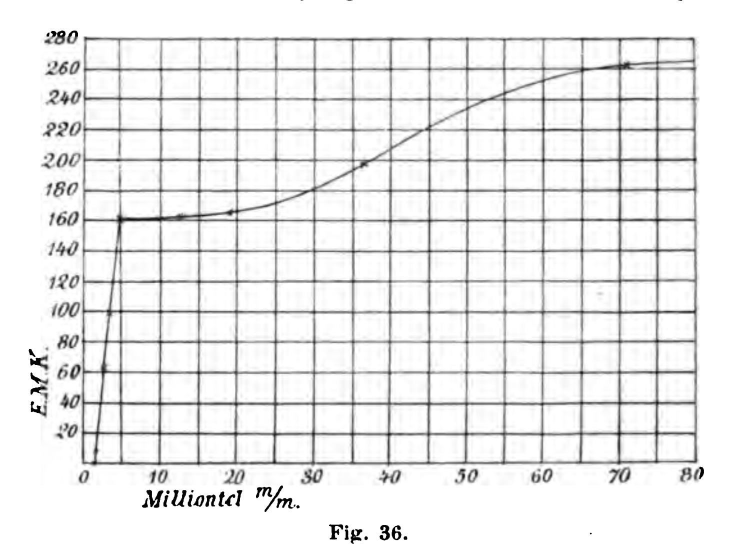


Fig. 36.

elektrischen Erregung von gegeneinander bewegten Stoffen oder Stoffteilen die Möglichkeit zur Erregung von Berührungsspannungen untergeordneter Bedeutung sehr gross. Auch zwischen anscheinend gleichen Leitern mit elektrolytischer Verbindungsschicht, welche häufig bereits durch die anhaftende Feuchtigkeit ausreichend gebildet werden kann, tritt sie auf, sobald nur geringe Struktur- oder chemische Veränderungen an der Oberfläche bestehen (vgl. z. B. WIED. II, 874 u. ff.).

Über die verschiedenen Zusammenstellungen von Leitern erster und zweiter Klasse zu Primärelementen, sowie über das Verhalten der praktisch wichtigeren Primärelemente beim Arbeiten, ihre Leistungsfähigkeit und dergleichen siehe II. III, 1.

Über die Erscheinungen endlich, welche in den Leitern erster und zweiter Klasse auftreten, wenn die kreislaufartige Leiteranordnung einen Ausgleich der elektrostatisch gespannten Elektrizität in Gestalt des elektrischen Stromes ermöglicht, siehe in der zweiten Abteilung dieses Bandes, ebenso über die hierbei in Frage kommenden energetischen Verhältnisse. Gerade nach dieser letzteren Richtung hat man streng zu unterscheiden zwischen der einfachen

Spannungserregung als der „in dieser Region (der elektromagnetischen Erscheinungen) obersten Thatsache" und den in ihrem Gefolge möglichen Ausgleicherscheinungen, da für die letzteren in erster Linie mit bedingend ist, welche Energiemenge in der die elektrische Spannung verursachenden Energieform zur Verfügung steht, um in elektromagnetische Energie umgewandelt werden zu können. Die bei allen spannungserregenden Ursachen in gleicher Weise den Ausgleich mitbedingende Energiegleichung wird ohne weiteres eine obere Grenze für die Ausgleicherscheinungen festlegen. Die Polarisationserscheinungen wären gleichfalls im Zusammenhang damit zu behandeln.

88. Strömungsspannungen.

Spannungserregungen, welche in physikalischen Werken vielfach als gesonderte Erscheinungsgruppen behandelt werden, deren Anschluss aber nach Ansicht des Verfassers vorläufig am besten an die „Berührungselektrizität" zu erfolgen hat, bilden einerseits diejenigen, welche beim Strömen von Flüssigkeit durch feste Wandungen auftreten, andererseits die krystallelektrischen Erscheinungen, welche mit dem Namen „Pyroelektrizität" und „Piëzoelektrizität" belegt zu werden pflegen. Am besten hier anzuschliessen wären endlich auch die noch ziemlich ungeklärten Erscheinungen der Spannungserregung bei den sogenannten Flammenelementen. Abgesehen von den unten angeführten Gründen für die Einreihung hinter die Erscheinungen der „Berührungselektrizität", bedürfen dieselben hier um so weniger einer eingehenden Behandlung in gesondertem Abschnitt, als sie mehr der Vollständigkeit und nicht ihres technischen Interesses halber im Rahmen des vorliegenden Werkes Erwähnung verlangen.

Die zuerst von Quincke (1859) beobachtete Thatsache, dass Flüssigkeiten, welche nicht völlig isolieren und durch mechanischen Druck zum Durchströmen von Diaphragmen oder auch eines einzelnen Kapillarrohres veranlasst werden, nachher einseitige elektrische Ladung, bezw. eine Spannung der ausströmenden Teile gegenüber den einströmenden aufweisen, wird unter sofortiger Hinzuziehung des bei vorhandenem elektrischem Stromkreis eintretenden und vielfach zur Messung oder Anzeige der Spannung benutzten elektrischen Stromes gewöhnlich unter der Bezeichnung „Strömungsströme" behandelt. Beschränkt man sich unter Vermeidung dieser in der Nomenklatur der bisherigen Physik ziemlich häufigen Vermengung oder Vereinigung (der ursächlichen Spannung mit dem sie unter gewissen Vorbedingungen begleitenden Strome) auch im vorliegenden Fall zunächst auf die Erscheinung der Spannungserregung als der „obersten" elektrischen Thatsache, so ergaben die Untersuchungen bei Variationen der Versuchsbedingungen, wie Art und Druck der strömenden Flüssigkeit, ferner Material, Dicke und Querschnitt der Diaphragmas, bezw. der ruhenden Wandung folgendes (vgl. Wk. III a, 504):

1) Bei reinem Wasser als Flüssigkeit war die Spannung der im ausströmenden Wasser befindlichen Elektrode gegenüber der aus gleichem Material bestehenden im einströmenden Wasser positiv, d. h der entstehende Strom bei aussen geschlossener Leitung ging mit dem strömenden Wasser. Die Grösse der erregten Spannung oder der EMK des Strömungselementes war bei demselben Material des Diaphragmas (Thonplatte) unabhängig von Dicke und Querschnitt, unabhängig von der Dauer des Strömens, d. h. der durchfliessenden Wassermenge, aber proportional mit dem angewandten Druck, unter welchem das Wasser floss.

2) Das Diaphragmenmaterial war von grossem Einfluss auf die Spannung. Bei reinem Wasser und bei konstantem Differenzdruck von etwa 1 Atmosphäre waren die in Volt umgerechneten Spannungen (EMKK) etwa:

Material des Diaphragma	EMK in Volt	Material des Diaphragma	EMK in Volt
Schwefel	10·75	Asbest	0·244
Quarzsand	6·83	Porzellanmasse	0·218
Schellack	3·63	Elfenbein	0·034
Seide	1·27	Tierische Blase	0·0165
Gebrannter Thon	0·398		

3) Veränderung der strömenden Flüssigkeit ändert auch die erregte Spannung; so wurde die letztere z. B. durch Alkoholzusatz zum Wasser gesteigert. Weitere Angaben über Diaphragmenströme siehe WIED. I, 1163 bis 1184.

Untersuchungen an einzelnen Kapillarrohren bestätigten im wesentlichen diese Resultate. Durch DORN wurde (1880) der direkte Nachweis geliefert, dass die Spannungserregung nur von der relativen Bewegung von Wasser und Wand herrührt (vgl. Wk. IIIa, 508), sowie dass bei gleicher mittlerer Geschwindigkeit die erregte Spannung etwa umgekehrt proportional wie der Rohrdurchmesser sich verhält. Ferner gelang es ihm durch Überziehen der Rohrwandung mit weissem Wachs eine Umkehrung der Spannung, d. h. im Rohr entgegen der Strömungsrichtung herbeizuführen. Ob diese Spannungserregung durch relative Bewegung von festen Körpern und Elektrolyten als „Reibungs- oder Berührungselektrizität“ aufzufassen, gilt noch als strittig. Erstere Ansicht wurde von ZÖLLNER, letztere von QUINCKE vertreten.

Eine vollständige Theorie in guter Übereinstimmung mit den Thatsachen wurde unabhängig von der Entscheidung über die Art der zu Grunde liegenden Ursache von HELMHOLTZ geliefert. Indem er — sei es, dass der elektrische Gegensatz zwischen Wand und Flüssigkeit durch Reibung, sei es, dass er durch Berührung, das ist chemische Differenzierung, veranlasst wird — die Ausbildung einer „Doppelschicht“ (elektrischen Verschiebung) zwischen Wand und Flüssigkeit annahm und sich die einseitige Ladung, bezw. Spannung der austretenden Flüssigkeit gegenüber der einströmenden durch Fortführung der einseitig „geladenen“ Flüssigkeitsteilchen beim Strömen erklärte, formulierte er den mathematischen Zusammenhang der verschiedenen mitwirkenden Faktoren auf Grund dieser Auffassung (vgl. Wk. IIIa, 514). Hiernach ergiebt sich die durch jeden Rohrquerschnitt in der Zeiteinheit fortgeführte Elektrizitätsmenge zu

$$Q_0 = -\frac{f \cdot q}{4\pi k^2 \cdot l}(e_i - e_a),$$

wenn f den mechanischen Druckunterschied zwischen Einströmung und Ausströmung, q den Rohrquerschnitt, l die Rohrlänge, k^2 die mechanische Reibungskonstante, $(e_i - e_a)$ die elektrische Spannung (Potentialdifferenz) zwischen dem Innern der Flüssigkeit und dem Umfange bezeichnet. Hieraus folgt die EMK des Strömungselementes durch Messung der entgegengesetzt gerichteten Spannung E, welche die Kompensierung, d. h. die Aufhebung der Elektrizitätsbewegung bewirkt, nämlich

$$E = J \cdot R = Q_0 \cdot \left(\frac{l \cdot \varrho}{q}\right),$$

wenn ϱ der spezifische elektrische Leitungswiderstand der Flüssigkeit, zu

$$E = \frac{f \cdot \varrho}{4\pi R^2}(k_1 - k_2)$$

in Übereinstimmung mit den obigen experimentellen Ergebnissen.

Abgesehen davon, dass verschiedene Untersuchungsergebnisse (vgl. Edlund 1877, Wied. Ann. 1. 161) die Zurückführung dieser Spannungserscheinungen nur auf Reibung sehr unwahrscheinlich machen, scheint auch die Grössenordnung der Spannungen mehr auf die chemische Differenzierung zwischen Wand und Flüssigkeit hinzuweisen. Vielleicht hat man es hier auch mit einer Übergangserscheinung zu thun, in welcher diese beiden Ursachen (Reibung und chemische Differenzierung) zusammenhängen, bezw. in einander übergehen, so dass eine scharfe Trennung nicht mehr besteht, oder, falls im Interesse einer bequemeren Einreihung vorgenommen, etwas willkürlich erscheinen muss. Nach Ansicht des Verfassers läge es vorläufig näher, diese Spannungserregung durch mechanisch bewegte (strömende) Flüssigkeit zwischen Wandungen, namentlich in Kapillarrohren und Diaphragmen als Spezialfall der Berührungsspannung zu betrachten. Nach dieser Auffassung würde das berührungselektrische Elementenpaar durch die feste Wandung und die bewegte Flüssigkeit gebildet, wobei jedoch durch den Umstand der fortwährenden Erneuerung und einseitigen Abführung der mit dem Wandmaterial korrespondierenden, d. h. einseitig elektrisch gespannten (mit einseitig elektrischer Ladung behafteten) Flüssigkeit eine Art Primärelement geschaffen wird. Bei der Strombildung, also beim Arbeiten des Elementes, wäre aber insofern ein wesentlicher Unterschied dieser vielleicht als Konvektions- oder Strömungselement zu bezeichnenden Energiequelle gegenüber den elektrochemischen Elementen vorhanden, als nicht chemische, sondern mechanische Bewegungsenergie in elektrische umgewandelt wird. In dieser Hinsicht würde die Erzeugung von elektrischer Spannungsenergie, sowie deren weitere Umsetzung wiederum Vergleichspunkte mit der Elektrisiermaschine, oder auch der Influenzmaschine, aufweisen.

Eine kurze Behandlung der Umkehrungserscheinungen, d. h. der ponderomotorischen Einwirkung elektrischer Spannung oder des begleitenden Stromes auf die mit relativer Beweglichkeit begabte Kombination von festen und flüssigen Körpern, welche als „elektrische Endosmose“ bezeichnet zu werden pflegt, soll erst an späterer Stelle erfolgen (vgl. **137**) entsprechend der gewählten Einteilung.

89. Krystallelektrizität und Flammenelemente.

Die „Krystall-Elektrizität“, welche vorläufig kaum irgend welche Berührungspunkte mit der Technik zu besitzen scheint, ist vielleicht später einmal berufen zur Aufklärung der dielektrischen Vorgänge beizutragen und besitzt daher trotz ihrer überwiegend mineralogisch-physikalischen Seiten für den Zusammenhang auch hier ein beschränktes Interesse. Die ins achtzehnte Jahrhundert zurückreichende von Aepinus (vgl. **5**) erkannte Thatsache, dass Turmalinprismen nach vorhergehender Erhitzung an ihren Enden elektrische Spannung und zwar von entgegengesetzter Natur zeigen, sowie ferner, dass diese Spannung beim Erwärmen das umgekehrte Vorzeichen aufweist als beim Abkühlen, stellt bereits das qualitativ Wichtigste der von Brewster (1824) als „pyroelektrisch“ bezeichneten Erregbarkeit dar. Die von Canton (1759) erfolgte Klarstellung, dass nicht die Erwärmung

selbst, sondern die Temperaturänderung die Ursache der Spannungserregung bildet, lässt uns diese Erscheinungsgruppe von der „Thermoelektrizität" trennen. Das Studium dieses Verhaltens an vielen anderen Krystallen liess eine Unterscheidung zwischen den sogenannten hemimorphen (mit einer ausgezeichneten Krystallachse begabten) und allen anderen Krystallen erkennen, insofern nur jene bei gleichförmiger Temperaturänderung Krystallelektrizität zeigten, während die übrigen nur bei ungleichförmiger, also zusätzliche Oberflächenspannungen erzeugenden Temperaturänderungen der einzelnen Krystallpartien diese „pyroelektrischen" Erscheinungen aufwiesen.

Die später auch durch quantitative Messungen von Gaugain (1856) und Riecke (1885) bestätigte Gleichwertigkeit der beiden „Krystallpole", d. h. die gleiche Grösse der bei der Temperaturänderung an den Enden entwickelten positiven und negativen Elektrizitätsmengen, sowie die für den Grenzfall völliger Isolation mögliche Dauer des elektrisch polarisierten Zustandes lassen die Krystalle als elektrische Analoga der permanenten Magnete interessant erscheinen.

Eine nähere Aufklärung über die eigentliche Ursache des Eintretens in einen solchen dielektrischen Zwangszustand von seiten der Krystalle brachte die Entdeckung der sogenannten „Piëzoelektrizität" durch J. und P. Curie im Jahre 1880, d. h. einer elektrischen (bezw. dielektrischen) Polarisation von Krystallen mit polaren Achsen durch rein mechanische Einwirkung in Gestalt einer Pressung (im Schraubstock). Weitere Versuche zeigten, dass mit Rücksicht auf die erzeugte Polarität Kompression der polaren Symmetrieachse der Abkühlung, hingegen ihre Dehnung der Erwärmung entspricht. Die in den Krystallen erzeugten mechanischen Spannungen bilden also in beiden Fällen die Ursache ihrer Elektrisierung und den verbindenden Untergrund beider Gebiete der krystallelektrischen Erscheinungen. Auf die verschiedenen, zum Teil von einander abweichenden theoretischen Formulierungen der letzteren, namentlich durch Voigt und Riecke unter Einführung einer grösseren Anzahl (18) krystallelektrischer Konstanten sei hier nicht näher eingegangen (vgl. Wk. III b, 535).

Nicht unerwähnt mögen hingegen die Hülfsvorstellungen von J. und P. Curie, sowie Lord Kelvin bleiben, welche diese krystallelektrischen Erscheinungen als Spezialfälle der „Berührungselektrizität" ansehen. Die erstgenannten Autoren führen die gleiche und gegensätzliche Elektrisierung der Krystallenden bei Anwendung einer mechanischen Spannung durch Druck, Zug (oder Erwärmung) auf eine gegenseitige Lagenänderung der Moleküle zurück und denken sich zu diesem Zweck in einem Turmalinkrystall die Moleküle nach Art einer Säule aufgebaut, welche aus zusammengelöteten Paaren von Kupfer und Zinkplatten besteht, jedoch von einander durch elastische isolierende (dielektrische) Zwischenlagen getrennt. Druck oder Zug ändert die Kapazität einer solchen Säule und lässt an den beiden Endplatten in solchem Falle sogenannte freie Elektrizität auftreten, während dieselbe unter normalen Verhältnissen eine gegenseitige Bindung erfährt, so dass die ganze Kombination nach aussen hin unelektrisch erscheint. Lord Kelvin (alias W. Thomson) hat (1893) ohne Kenntnis dieser Vorstellung eine ganz ähnliche entwickelt und unter weiterer Verfolgung dieser Analogie (vgl. Wk. III b, 547) ein Modell eines solchen Krystalles auf dieser Grundlage konstruiert.

Auch hier sind die entsprechenden Umkehrerscheinungen beobachtet und verfolgt worden, d. h. die Beeinflussung von Krystallen, welche in ein elektrostatisches Feld gebracht werden, in der Weise, dass die Elektrisierung mechanische Spannungen, bezw. Deformationen der Krystalle veranlasst, weiterhin mit einer Änderung der optischen Eigenschaften (Doppelbrechung). (Näheres vgl. Wk. IIIb, 547 u. ff.)

Die Erzeugung von elektrischer Spannung durch Flammen ist durch mannigfaltige Versuche nachgewiesen worden (eine Zusammenstellung der Litteratur hierüber findet sich in Wk. IIIa, 349), doch ist eine einwandfreie Erklärung für die Entstehung dieser Flammenspannungen oder der hieraus bei äusserem Stromschluss resultierenden „Flammenströme" noch nicht gefunden worden. Die zum Teil allein, zum Teil in Kombinationen als Ursachen vermuteten Vorgänge sind folgende (vgl. Wk. IIIa, 350):

a) der Verbrennungsprozess als solcher (chemoelektrische Spannungserregung nach POUILLET),

b) die Berührung zwischen den Elektroden — z. B. Brenner einerseits, das in der Flammenspitze glühende Metall, meist Platin, andererseits; oder auch zwei gleiche Metalldrähte im Innern und am Rande der Flamme — und den verschiedenen Flammenschichten, welche sie umspülen (Kontaktelektrizität nach BRAUN),

c) die thermoelektrische Differenz der Elektroden (Thermoelektrizität nach BRAUN),

d) die Reibung der Flammengase gegen die eingesenkten Elektroden (Reibungselektrizität nach HENRICI).

Am eingehendsten sind diese Erscheinungen von ELSTER und GEITEL in den Jahren 1882 bis 1889 (vgl. Wk. IIIa, 351, oder die Originalarbeiten in WIED. Ann.) untersucht worden. Sie halten eine Elektrizitätserregung durch den Verbrennungsprozess als solchen für ausgeschlossen, ebenso durch Thermoströme und neigen der Annahme d) zu. Alle diese Erscheinungen, welche mit der Spannungserregung durch Kontakt von Gasen mit glühenden Körpern zusammenhängen, haben aber auch hierdurch noch keine ausreichende Erklärung gefunden. Die Spannungen, was vielleicht am nächsten zu liegen scheint, als Thermospannungen anzusprechen, scheint schon wegen ihrer Grösse unzulässig, da hierbei Werte von 1 bis 2 Volt bei einem Flammenelement gefunden wurden. An eine technische Verwendung kann wegen der ausserordentlichen Grösse des Widerstandes der Flammenstrecke (Grössenordnung 10 Ω) und der entsprechenden Kleinheit der Stromstärke nicht gedacht werden. Einige nähere Angaben über diese Flammenelemente finden sich H. III, 1 in § 19.

3. Spannungserregung durch Temperaturunterschiede (Thermoelektrizität).

90. Allgemeines und Richtung der Thermospannungen.

Eine der Spannungserregung durch Berührung in vieler Hinsicht nahestehende, ja mit ihr stellenweise direkt zusammenhängende Ursache bildet die Erregung elektrischer Spannung durch Temperaturunterschiede, besser vielleicht Temperaturgefälle längs verschiedener mit einander verbundener Leiterstrecken. Im vorhergehenden Fall der Spannungserregung durch Berührung war die Temperaturfrage nicht näher behandelt und eigentlich stillschweigend angenommen worden, dass die Temperatur der sich berührenden

heterogenen und chemisch in irgend einer Wechselwirkung stehenden Leiter die gleiche ist; mit anderen Worten, dieser selbst wieder elektrische Spannung erregende Faktor war analog der Untersuchung komplizierterer mathematischer Funktionen bei der Betrachtung der Berührungspannungs-Erscheinungen als konstant angesehen worden, um eine Erschwerung der Übersicht durch Komplizierung der Verhältnisse zu vermeiden.

Vielfach ist schon die Temperaturverschiedenheit zwischen Stellen von scheinbar ein und demselben Leitermaterial, z. B. bei einem Draht, als Ursache eines elektrischen Stromes, bezw. einer elektrischen Spannung beobachtet worden. Diese Thatsache, welche wenigstens für nichtflüssige Leiter festzustehen scheint, obwohl ein grosser Teil dieser Beobachtungen noch sehr der Klärung bedarf (vgl. unten), würde darauf hinweisen, dass hier der abweichende Wärmezustand an Stelle der Materialverschiedenheit getreten ist, bezw. dieselbe bedingt. Wenn andererseits zwei verschiedene Materialien, z. B. Eisen und Kupfer, abhängig von der Temperatur an der Verbindungs- oder Lötstelle an ihren freien Enden eine variable Spannung zeigen, welche bis zu einem Maximum steigt, dann weiterhin bis auf Null abnimmt und endlich das Zeichen umkehrt, so scheint auch dies darauf hinzudeuten, dass der Temperaturzustand eine gewisse qualitative Gleichwertigkeit mit den materiellen Eigenschaften besitzt, welche die Berührungsspannung bedingen, insofern auch hier die durch die Temperatur veränderte chemische Beziehung zwischen den Materialien auf die Spannungsgrösse einwirkt.

Bei den thermoelektrischen Erscheinungen ist es aber trotz der vielfachen Untersuchungen und der zahlreichen Einzelbeobachtungen auf diesem Gebiete bisher noch nicht möglich gewesen, eine allgemeine, gleichsam weiter zurückliegende, d. h. erklärende Ursache für sie aufzufinden, da bisher alle Versuche, diese Erscheinungen mit anderen Materialeigenschaften in engeren Zusammenhang zu bringen, keine einheitliche und durchgreifende Lösung, etwa nach Art der chemischen Theorie bei der Berührungselektrizität, ermöglicht haben. Alle diese Versuche tragen vielmehr noch mehr oder weniger den Charakter von unbewiesenen Vermutungen, wie dies auch für die oben angedeuteten Beziehungen zwischen Berührungs- und thermoelektrischer Spannung der Fall ist. Dieser Mangel einer vorläufigen Erkenntnis oder auch nur der Theorie einer weiter zurückliegenden Ursache, welche eine innigere Verbindung mit den übrigen Materialeigenschaften ermöglicht, hat aber die Auffindung einer Anzahl wichtiger gesetzmässiger Beziehungen auf diesem Gebiet nicht verhindert, so dass die Abhängigkeit der Spannung von der Temperaturdifferenz und ihrem absoluten Wert wenigstens für Metalle in den wesentlichen Punkten festgelegt ist. Auch hier ist eine allgemeine gleichzeitige Behandlung aller elektrischen Leiter nicht angängig, sondern es sind, ähnlich wie bei der Berührungsspannung, zunächst Leiter erster Klasse, vor allem Metalle, auszuscheiden und das Wenige anzufügen, was über das thermoelektrische Verhalten von Leitern zweiter Klasse, entweder unter sich oder in Verbindung mit Leitern erster Klasse zuverlässig beobachtet und erwähnenswert erscheint. Ferner sei auch hier das qualitative Verhalten dem quantitativen vorangestellt.

Wie bereits (vgl. 18) erwähnt, hat Seebeck, der Entdecker und erste Forscher auf diesem Gebiet, das Wesentliche des qualitativen Verhaltens der Metalle in thermoelektrischer Beziehung durch Aufstellung der thermo-

elektrischen Spannungsreihe aufgefunden (1821 bis 1823: „Die magnetische Polarisation der Metalle und Erze durch Temperaturdifferenz“, vgl. OSTW., Klass. No. 70). Die von ihm aufgestellte Spannungsreihe war (vgl. a. a. O., Artikel 31):

—	Messing I	Chrom	Wolfram
Wismut	Gold (90%) I	Molybdän	Platin (verarb.) IV
Nickel	Kupfer (käuflich) I	Kupfer II	Kadmium
Kobalt	Messing II	Rhodium	Stahl
Palladium	Platin II	Iridium	Eisen
Platin (rein) I	Quecksilber	Gold (rein) II	Arsen
Uran	Blei	Silber	Antimon
Kupfer (rein) No. 0	Zinn	Zink	Tellur
Mangan	Platin III	Cementkupfer III	+
(Stickstoff-) Titan			

Zur Vermeidung von Missverständnissen bezüglich des Vorzeichens ist zu beachten, dass sich die Vorzeichen hier auf die Angaben des Messinstrumentes beziehen, d. h. dass je eins der folgenden Metalle mit jedem voraufgegangenen verbunden und an der Verbindungsstelle erwärmt,

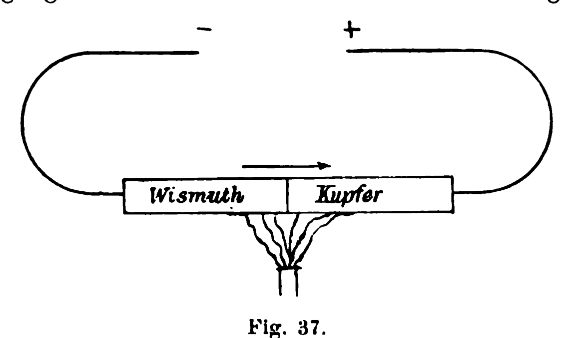


Fig. 37.

am freien Ende positiven elektrischen Spannungszustand zeigt; an der erwärmten Verbindungsstelle ist sonach die Richtung des elektrischen Druckes oder der Spannung umgekehrt, wie Fig. 37 am Beispiel von Wismut und Kupfer zeigt. Ferner lassen die bei Messing und Platin auf verschiedene Metallproben bezüglichen Nummern, ebenso wie die weit auseinander befindlichen Stellungen verschiedener Kupfersorten erkennen, dass bereits in qualitativer Hinsicht bei Metallen, welche in chemischer Beziehung nicht sehr rein sind oder in physikalischer Beziehung abweichende Strukturverhältnisse aufweisen, erhebliche Unsicherheiten beziehungsweise Abweichungen zu erwarten sind, was sich auch vielfach bestätigt hat.

Bezüglich späterer Berichtigungen und Ergänzungen dieser thermoelektrischen Spannungsreihe ist als wesentlich hinzuzufügen, dass nicht nur die obenerwähnte Materialbeschaffenheit, sondern auch die Grösse der Temperaturdifferenz erhebliche Verschiebungen hervorzurufen vermag, wie aus den späteren quantitativen Beziehungen (vgl. **93**) und dem Einfluss des absoluten Wertes der Temperatur auch ohne weiteres einleuchtet, so dass jede derartige Spannungsreihe auch bei denselben Materialien überhaupt nur für bestimmte Temperaturdifferenzen eine Giltigkeit besitzen kann.

So fand z. B. HANKEL 1844 (vgl. WIED. II, 368) bei der in Fig. 37 angedeuteten Kombination der verschiedenen Metalle unter einander durch Beobachtung der Ausschlagsrichtung am Messinstrument folgende Änderung der Reihenfolge:

Bei geringen Temperaturdifferenzen		Bei grossen Temperaturdifferenzen	
—	Blei	—	Blei
Wismut	Kupferdraht	Wismut	Eisen
Neusilber	Zink	Kobalt	Kupferdraht
Nickel	Silber	Neusilber	Silber
Kobalt	Galvanisches Kupfer	Platinblech	Galvanisches Kupfer
Platinblech	Kadmium	Nickel	Zink
Gold	Eisen	Messing	Kadmium
Messing	Antimon	Gold	Antimon
Zinn	+	Zinn	+

Bemerkenswert unter den Feststellungen von SEEBECK bleibt noch die Einreihung einer grösseren Zahl von Legierungen in die Spannungsreihe (vgl. WIED. II, 318) mit der gleichzeitigen Bemerkung, dass die Legierung nicht zwischen ihren Komponenten zu stehen braucht, sondern häufig weit ausserhalb, z. B. Neusilber, welches viel negativer ist als seine drei Bestandteile: Nickel, Kupfer und Zink. Spätere genauere Untersuchungen von ROLLMANN über den Einfluss allmählicher prozentualer Änderungen der Komponenten (vgl. WIED. II, 318) hat eine allmähliche Hin- und Herverschiebung ihrer Stellung in der thermoelektrischen Spannungsreihe ergeben, wobei der Wendepunkt durch die Bildung einer chemischen Verbindung bei einem bestimmten Verhältnis der gemischten Metalle bedingt zu sein scheint (vgl. auch **96** sowie das elektrische Leitvermögen der Legierungen H. I, 2 in **222**).

Eine später gleichfalls weiter ausgebaute Beobachtung von SEEBECK bildet das verschiedene thermoelektrische Verhalten nicht nur der verschiedenen Eisen-, sondern auch verschieden harter Stahlsorten. Dieser später näher von BARUS (vgl. 1879, WIED. Ann. 7, 383) untersuchte Zusammenhang hat ihn dazu geführt, die Änderung des thermoelektrischen Verhaltens als ein direktes praktisches Mass für die Härte des Stahles vorzuschlagen; doch führt dies bereits hinüber zu den quantitativen Verhältnissen der thermoelektrischen Erscheinungen.

91. Quantitative Bestimmungen von Thermospannungen.

Die erste wesentliche Beobachtung nach dieser Richtung, welche für die thermoelektrischen Untersuchungen, sowie für den Aufbau von Thermoketten und -säulen von grosser praktischer Wichtigkeit ist und in gewisser Hinsicht die Bedeutung der Spannungsreihe erweitert, bildet die Thatsache, dass die Einfügung eines oder mehrerer Metalle, deren Endstellen jedoch dieselbe Temperatur besitzen, auf die Grösse der thermoelektrischen Spannung ohne Einfluss bleibt. Hierdurch ist die Verbindung der Metalle durch Verlöten, also Einfügung von Zinn oder einer anderen Metallmischung zwischen beide, z. B. oben in Fig. 37 *Bi-Cu*, möglich ohne die thermoelektrische Spannung an den freien Enden zu beeinflussen, wenn die ganze Lötstelle in

heit der Legierungen, sondern auch in hohem Grade die sogenannte Härte die quantitativen Werte stark beeinflusst, wie schon oben bei der qualitativen Spannungsreihe bemerkt wurde. Die einzelnen Bestimmungen weichen daher nicht unbeträchtlich von einander ab, selbst wenn die Temperaturunterschiede gleich genommen werden, was auch noch sehr häufig nicht der Fall ist. Als ungefährer Anhaltspunkt sei hier nur eine (1864) von E. Becquerel (vgl. Wied. II, 314) ausgeführte Messung für den Temperaturunterschied 0—100° C. angeführt. Die Zahlen geben die thermoelektrischen Spannungen gegen Kupfer an und zwar in Milli-Daniell, so dass die Werte in Millivolt etwa wieder um 10 % grösser zu setzen sind.

Thermospannungen gegen Kupfer für 0—100° C.
in Milli-Daniell (etwa 1·1 Millivolt):

Wismut	— 3·91	Blei	— 0·187	Silber	+ 0·026
Kobalt	— 2·24	Zinn	— 0·147	Kadmium	+ 0·033
Nickel	— 1·63	Gaskohle	— 0·142	Eisen	+ 0·950
Neusilber	— 1·26	Platin	— 0·090 bis 0·378		bis 0·674
Palladium	— 0·82	Zink	— 0·018 bis 0·037	Antimon	+ 1·41
Quecksilber	— 0·483	Kupfer	+ 0·000	Tellur	+ 39·95

Im Gegensatz zu der geringen Sicherheit, welche derartige allgemeine Angaben über die quantitative Grösse der Thermospannung zwischen zwei Metallen besitzen, ist die Spannung eines gegebenen Thermoelementes bei Wahrung der Temperaturdifferenz sehr konstant. Nach jeweiliger Feststellung des absoluten Wertes oder bei Nichtbenötigung desselben auch ohne diese ist es für Untersuchungen und Vergleiche gut geeignet, wenn kleine Spannungen benötigt werden. Die wesentliche Rolle der Thermoelektrizität für die Untersuchungen Ohms, sowie die Anordnung des benutzten Elementes wurde bereits im geschichtlichen Abschnitt (vgl. **24** sowie Fig. 2) angeführt. Zur Erzielung konstanter Spannung dürfte — namentlich für Laboratoriumszwecke — die Anordnung in Fig. 39 (aus Wied. II, Fig. 57) durch Einfachheit und Bequemlichkeit sich auszeichnen, wobei zu der im allgemeinen sich selbst erläuternden Abbildung nur noch hinzuzufügen wäre, dass die beiden Reagensgläser *a* und *b*, welche die beiden Lötstellen beim Hochstellen der Gefässe *A* und *B* aufnehmen mit Paraffinöl gefüllt werden, und von den letzteren das eine mit Eis oder Schnee beschickt wird, während das andere mit Wasser gefüllt und bis zur Siedetemperatur geheizt wird.

92. Thermospannungen abhängig von der absoluten Temperatur.

Abgesehen von der praktischen Verwendung der durch Hintereinanderschaltung zu Thermosäulen vereinigten Metallpaare oder Thermoelemente, welche näher in Bd. III behandelt werden, besitzen die Thermospannungen für Temperaturmessungen technische Wichtigkeit (vgl. **94**).

Hierfür ist aber der zahlenmässige Zusammenhang zwischen thermoelektrischer Spannung und den Temperaturgrenzen (der vereinigten und der freien Enden) unerlässlich. Die ersten Beobachtungen über den Zusammenhang der Thermospannung E mit den in nicht sehr weiten Grenzen genommenen Temperaturen t_1 und t_2 der warmen und kalten Enden schienen auf eine Proportionalität zwischen E und $(t_1 - t_2)$ hinzuweisen. Thatsächlich ist auch diese Proportionalität für einige Zusammenstellungen von Metallen,

z. B. Eisen-Platin zwischen 0 und 100° C. (auch noch darüber) so nahe erfüllt, dass eine praktische Abstraktion von den kleinen Abweichungen zulässig erscheint; bei höheren Temperaturen tritt aber auch in allen diesen Fällen eine sehr merkliche Abweichung ein; bei anderen Zusammenstellungen, z. B. Zink-Eisen ist auch innerhalb engerer Grenzen die Proportionalität nicht gewahrt, d. h. $\frac{dE}{dt}$ keine konstante Grösse. Dass die Kurven, welche bei graphischer Auftragung den Zusammenhang zwischen Thermospannung (Ordinaten) und Temperatur der wärmeren Verbindungsstelle, bezw. dem angewandten Temperaturunterschied (Abscissen) zwischen *a* und *b* (vgl. Fig. 39) darstellen, sowohl konkave als konvexe Krümmung gegen die Abscissenachse aufweisen, also teils langsamer, teils rascher als der Temperaturunterschied wachsen, liessen bereits folgende Messungen von Draper

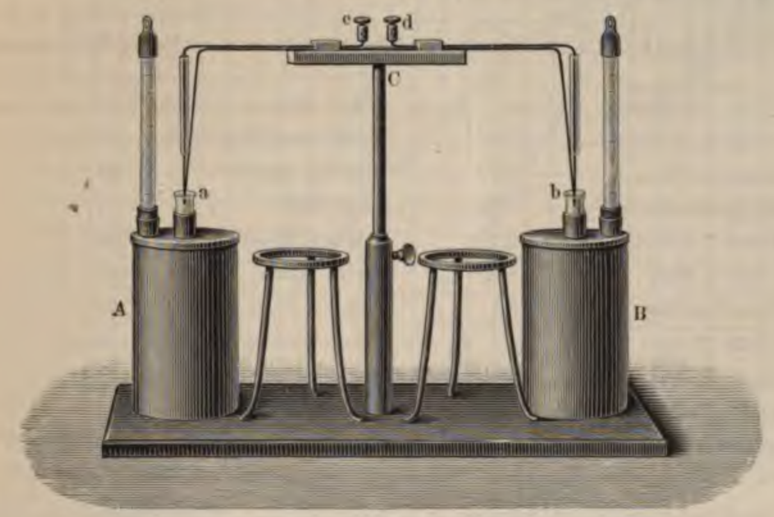


Fig. 39.

(1840) (vgl. Wied. II, 362) erkennen, bei welcher die freien (äusseren) Enden auf 0° C. gehalten wurden, während die (innere) Lötstelle der beiden Metalle auf 50, 100 und 280° C. erwärmt wurde.

Relative Werte der Thermospannung beim Temperaturunterschied:

	0 bis 50° C.	0 bis 100° C.	δ	0 bis 280° C.	δ
Kupfer-Eisen	93	176	— 10	233	— 287
Silber-Palladium	65	147	+ 17	613	+ 249
Eisen-Palladium	112	223	— 1	631	+ 4
Platin-Kupfer	11	26	+ 4	122	+ 60
Eisen-Silber	89	137	— 51	244	— 254
Eisen-Platin	28	56	0	148	— 9

Die Abweichungen von der **Proportionalität** oder der Kurven von der Geradlinigkeit sind unter δ in den benutzten willkürlichen Masseinheiten beigefügt.

Die zuerst qualitativ von SEEBECK (vgl. **18** und **90**) beobachtete Thatsache, dass bei immer weiterer Steigerung des Temperaturunterschiedes einige Zusammenstellungen von Metallen, z. B. Zink-Eisen nach Überschreitung eines Spannungmaximums eine Verkleinerung der Thermospannung zeigen, schliesslich sogar eine polare Umkehrung, führte BECQUEREL (1826), sowie HANKEL (1844) zur angenäherten quantitativen Bestimmung dieser ausgezeichneten Kurvenpunkte für einzelne Elemente. Genauer erfolgte die experimentelle Ermittelung der sogenannten neutralen Punkte (Maximalwerte der Thermospannung) durch W. THOMSON (1856), welcher für die nachstehenden Thermoelemente dieselben in Celsiusgraden folgendermassen angiebt:

Neutrale Punkte von Thermoelementen nach W. Thomson:

Element	Neutraler Punkt		Element	Neutraler Punkt	
Platin III-Messing	— 14°	C.	Silber-Zink	+ 47 bis 71°	C.
Platin I-Kadmium	— 12·2°	„	Harter Stahl-Kadmium	+ 57°	„
Silber-Gold	— 5·7°	„	Platin I-Kupfer	+ 64°	„
Platin III-Gold	— 3·06°	„	Gold-Zink	+ 71°	„
Platin I-Silber	— 1·5°	„	Platin I-Messing	+ 99°	„
Platin I-Zink	+ 8·2°	„	Platin I-Blei	+ 121°	„
Zinn-Messing	+ 33°	„	Platin I-Zinn	+ 130°	„
Platin II-Blei	+ 36°	„	Eisen-Kadmium	+ 162·5°	„
Platin II-Messing	+ 38°	„	Eisen-Gold	+ 223 bis 253·5°	„
Platin II-Zinn	+ 44°	„	Eisen-Silber	+ 237°	„
Blei-Messing	+ 44°	„	Eisen-Kupfer	+ 280°	„

Der auch hier stark hervortretende Einfluss der Materialstruktur (Härte) geht aus den sehr verschiedenen Verhältnissen der drei verschiedenen Platine hervor. Teils durch experimentelle Untersuchungen, teils auf Grund von Extrapolationen (eingeklammerte Zahlen) mit Hülfe der sogleich zu erwähnenden Formulierungen und Diagramme wurden diese Zahlen von TAIT vervollständigt (1872—1874, vgl. WIED. II, 381).

Neutrale Punkte in Celsiusgraden nach Tait:

Element	Neutraler Punkt		Element	Neutraler Punkt	
Fe-Cu I	+ 265°	C.	Fe-Al	(+ 387°)	C.
Fe-Cu II	+ 260°	„	Cu I-Cd	(— 23°)	„
Fe-Cd	+ 159°	„	Cu I-Zn	(— 146°)	„
Fe-Zn	+ 199°	„	Cu I-Ag	(— 687°)	„
Fe-Ag	+ 235°	„	Cu II-Pb	(— 213°)	„
Fe-Pb	(+ 357°)	„	Pb-Cd	(— 74°)	„
Fe-M(essing)	(+ 318°)	„	Pb-Pd	(— 188°)	„
Fe-Pt	(+ 519°)	„	Pb-Zn	(— 78°)	„
Fe-Sn	(+ 416°)	„	Pb-Ag	(— 282°)	„
Fe-Pd	(+ 1908°)	„			

Die eingeklammerten Zahlen wurden durch folgende Überlegungen gewonnen[1]):

93. Thermoelektrische Koeffizienten und Vorausbestimmung der Spannungen.

Trägt man, wie oben angedeutet, die Thermospannungen für jede Zusammenstellung von je zwei Metallen oder Legierungen als Ordinaten abhängig von den Temperaturen in C.° (als Abscissen) auf, so erhält man, ausgehend von einer bestimmten Anfangs- oder Normaltemperatur (20° C. in Fig. 40) Kurven, welche mehr oder weniger von den Geraden abweichen und zum Teil nach

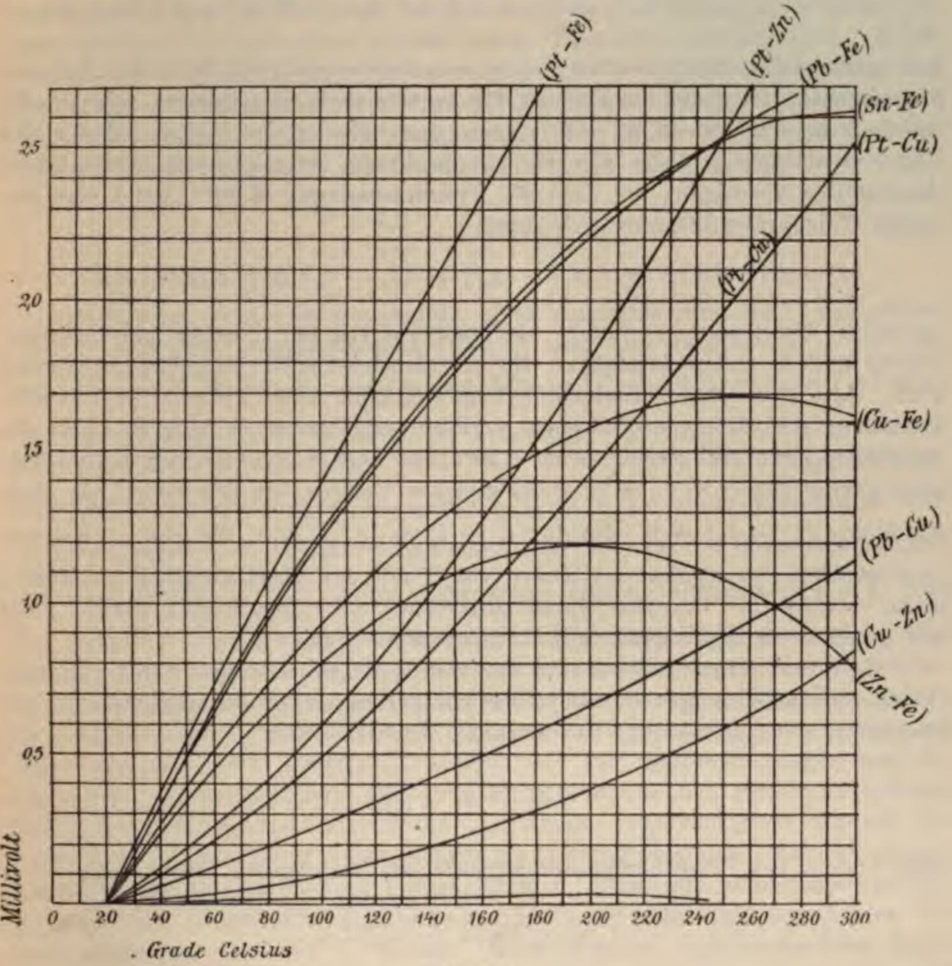


Fig. 40.

Erreichung eines Maximalwertes (neutraler Punkt) einen zur Maximalspannung symmetrischen Verlauf zeigen. Die Tangenten an die Kurven schliessen mit der Abscissenachse Winkel ein, welche ein Mass für die Geschwindigkeit der Spannungsänderung mit der Temperaturänderung $\frac{dE}{dt}$ für irgend eine Temperatur t liefern. In Fig. 40 sind diese Kurven in ihrem angenäherten

1) In den nachfolgenden Ausführungen und graphischen Darstellungen wurden nicht nur die Massstäbe für den Techniker brauchbarer gemacht, sondern auch die Darstellung gegenüber derjenigen in physikalischen Werken umgeändert, um sie für den vorliegenden Zweck geeigneter zu machen.

Verlauf für einige Metallzusammenstellungen angegeben, wobei als Massstab für die Ordinaten Millivolt (Volt $\cdot 10^{-3}$) gewählt wurden. Derartige Kurven lassen sich im allgemeinen als Exponentialfunktion des Argumentes, das ist hier der Temperatur darstellen, so dass die gesetzmässige Formulierung der Abhängigkeit der Thermospannung E (thermoelektrische Kraft) für zwei beliebige Temperaturgrenzen t_1 und t_2 durch die Gleichung gegeben wäre:

$$\int_{t_2}^{t_1} dE = E_1 - E_2 = b\,(t_1 - t_2) + c\,(t_1^2 - t_2^2) + d\,(t_1^3 - t_2^3) + \cdots$$

Die Vergleichung dieser Formel mit den von AVENARIUS (1863 POGG. Ann. 119, 406) experimentell festgestellten Kurven für verschiedene Metallpaare, wie *Cu-Fe*, *Ag-Zn*, *Ag-Fe*, *Cu-Zn* u. s. f. ergab, dass die ersten beiden Glieder der Experimentalformel diese Kurven mit praktisch ausreichender Genauigkeit darzustellen vermögen, so dass die Thermospannung E für irgend eine benutzte Temperaturdifferenz sich durch

$$E = b\,(t_1 - t_2) \pm c\,(t_1^2 - t_2^2) = (t_1 - t_2)\,[b \pm c\,(t_1 + t_2)]$$

darstellen lässt, wenn t_1 und t_2 die Temperaturen der (inneren und äusseren) Enden und b und c Ausdrücke für thermoelektrische Materialkoeffizienten sind. Aus der letzten Gleichung folgt sogleich ohne weiteres in Übereinstimmung mit dem parabolischen Verlauf der Kurven in Fig. 40, dass die Spannung E zu Null wird, wenn einer der beiden Faktoren zu Null wird; also sowohl für $t_1 - t_2 = 0$, d. h. gleicher Temperatur der Enden als auch für $b \pm c\,(t_1 + t_2) = 0$ oder für $t_1 + t_2 = \mp \frac{b}{c}$, d. h. für ein t_2, welches dem zweiten Schnittpunkt der Kurve von E mit der Abscissenachse entspricht, wenn t_1 (z. B. 20° C.) dem ersten entspricht, oder allgemeiner für je zwei zur gleichen Ordinate gehörigen Temperaturen t_1 und t_2.

Weiterhin folgt bei Annahme der richtigen „Beschreibung" des thatsächlichen Zusammenhanges durch jene Formulierung, dass der Maximalwert der Spannung E (Scheitelpunkt der Parabel) auf den Wert

$$\frac{t_1 + t_2}{2} = \mp \frac{b}{2c}$$

fällt, sodass bei Bezeichnung der zugehörigen Temperatur mit t_m man

$$t_1 + t_2 = \mp \frac{b}{c} = 2\,t_m$$

setzen kann, oder

$$E = b\,(t_1 - t_2)\left[1 \mp \frac{t_1 + t_2}{2\,t_m}\right].$$

Die beiden letzten Tabellen geben also für die in ihnen angegebenen Metallpaare den Wert t_m, d. h. der Temperatur in C.°, bei welcher die Spannungsparabel ihren Scheitelpunkt (Maximalwert, neutralen Punkt) besitzt.

Die Thermospannungen aller Metallkombinationen — mit vereinzelten Ausnahmen bezw. Unregelmässigkeiten, namentlich bei den magnetischen Metallen, wie Nickel, welche später zu erwähnen sind — passen sich praktisch ausreichend dieser Formulierung von AVENARIUS an, welche nur die erste und zweite Potenz der Temperatur enthält. Diese Thatsache erlaubt

für alle Metalle die weitere Ableitung von thermoelektrischen Materialkonstanten, sowie deren diagrammatische Darstellung, wonach rechnerisch oder graphisch die Thermospannungen für jede beliebige Zusammenstellung der untersuchten Metalle und für jeden beliebigen Temperaturunterschied sofort ermittelt werden können.

Die geistige Bewältigung dieser anfänglich vielleicht etwas fremdartig anmutenden Betrachtungen wird bedeutend erleichtert durch Analogisierung derselben mit den Verhältnissen bei den mechanischen Bewegungsgleichungen, namentlich den Fallgesetzen, welche jedem Techniker geläufig sind. Durch Überleitung in geläufigere Gedankenbahnen ist auch im vorliegenden Fall eine höhere Wirtschaftlichkeit (Ökonomie), d. h. hier raschere Übersicht und Überwindung geistiger Schwierigkeiten erzielbar. Differenziert man die obige (erste) Formulierung nach der Temperatur t_1, so erhält man

$$\frac{dE}{dt_1} = b \pm 2c\,t_1.$$

Bezeichnet man vorübergehend, unter Analogisierung der Thermospannung E mit dem zurückgelegten Weg S und der Temperatur t_1 mit der Zeit τ in den Fallgesetzen, diese erste Ableitung $\frac{dE}{dt}$ als thermoelektrische Geschwindigkeit, so lässt die Gleichung erkennen, dass jene im allgemeinen nicht konstant sein wird, falls c nicht den Wert Null annimmt. Hingegen wird die zweite Ableitung $\frac{d^2E}{dt^2} = \pm 2c$ einen konstanten Wert besitzen analog der Fallbeschleunigung, d. h. die auf die Temperatureinheit bezogene Änderung der thermoelektrischen Geschwindigkeit $\frac{d}{dt}\left(\frac{dE}{dt}\right)$, oder die thermoelektrische Beschleunigung wird für jedes Metallpaar einen konstanten Wert besitzen. Hierbei werden jedoch die verschiedenen thermoelektrischen Beschleunigungen $\pm 2c$ nicht nur bezüglich des Vorzeichens sich unterscheiden, sondern auch für jede andere Metallzusammensetzung einen anderen Wert annehmen, ähnlich wie die Beschleunigungen auf verschiedenen Himmelskörpern dies thun. Um nun von der gerade getroffenen Wahl der zwei thermoelektrisch thätigen Metalle unabhängig zu sein und für jedes Metall eine eigene thermoelektrische Materialkonstante (Beschleunigung) festsetzen zu können, ist zu berücksichtigen, dass die allein experimentell bestimmbare Kombinationsbeschleunigung $\pm 2c$ sich aus den beiden Beschleunigungen der beiden Metalle (Komponenten) zusammensetzen muss. Setzt man deshalb

$$\pm 2c = k_2 \pm k_1,$$

so würden k_2 und k_1 jene Materialkonstanten (thermoelektrischen Beschleunigungen) der Einzelmetalle darstellen. Gäbe es ferner ein Metall, dessen thermoelektrische Beschleunigung Null ist, also z. B. $k_1 = 0$, so würde die thermoelektrische Kombination dieses Metalles mit allen anderen Metallen und Legierungen, die direkte Bestimmung von $k_2 = \pm 2c$ ermöglichen, da $2c$ aus den Beobachtungen der Spannungswerte E für verschiedene Temperaturgrenzen t_1 und t_2, d. h. der Ermittelung der Spannungskurven, wie in Fig. 40 sich ergiebt. Ein Metall, welches innerhalb der Beobachtungsgrenzen diese Bedingung ($k_1 = 0$) praktisch ausreichend erfüllt, ist das Blei, welches daher

auch als thermoelektrisches Normalmetall angesehen wird (vgl. hierzu die Stellung von Blei in der Tabelle für die „THOMSON-Erscheinung“ in 96). Als „Erklärung“ wird in Physikerkreisen gewöhnlich angenommen, dass das Blei seine Strukturverhältnisse bei Temperaturvariation nicht merklich ändert, während die Änderung der thermoelektrischen Geschwindigkeit bei den anderen Metallen darauf zurückgeführt wird, dass Hand in Hand mit der

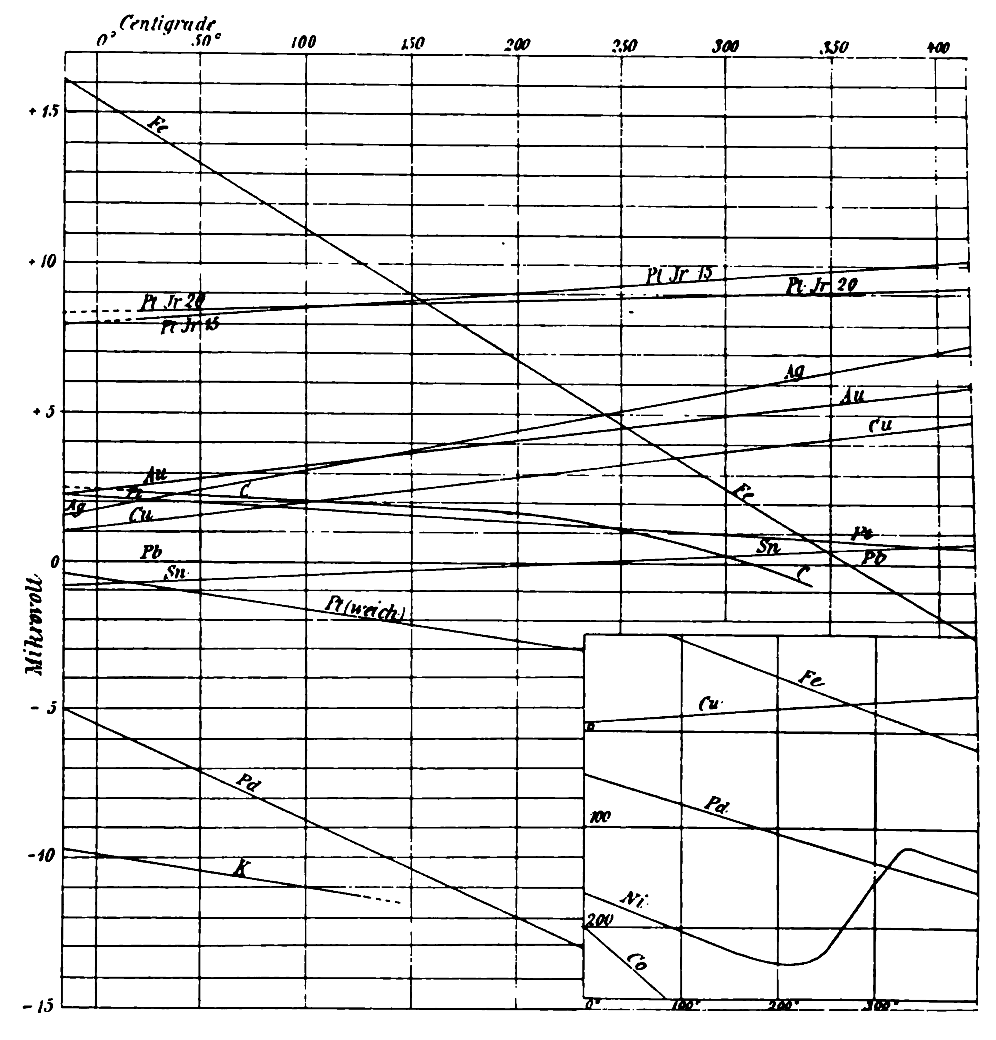


Fig. 41.

Temperatur sich ihre „Struktur“ ändert (vgl. WIED. II, 379); was natürlich nur einen Ausdruck für einen noch unaufgeklärten Zusammenhang darstellt. Denkt man sich nun (vgl. Fig. 41) als „thermoelektrisches Diagramm“ das Normalmetall Blei mit der thermoelektrischen Beschleunigung Null in Richtung der als Temperaturmassstab dienenden Abscissenachse liegend, so werden die gegen Blei thermoelektrisch-positiven Metalle oberhalb, die negativen unterhalb zur Darstellung gelangen. Diese Darstellung ist in der Fig. 41 nach TAIT so erfolgt, dass gegen Blei (*Pb*) als Normalmetall

(Nullniveau) nicht wie in Fig. 40 die thermoelektrische Spannung E, sondern die erste Ableitung nach der Temperatur (thermoelektrische Geschwindigkeit) $\frac{dE}{dt}$ als Ordinate zu jeder Temperatur t in C.° (als Abscisse) aufgetragen ist. Hierdurch ist Folgendes erreicht, bezw. aus dem Diagramm zu entnehmen, wenn diese Auftragung für alle in Frage kommenden Metalle und Legierungen erfolgt (in Fig. 41 ist dies der besseren Übersicht halber nur für eine Reihe der wichtigeren geschehen):

1) Da die Thermospannungen der mit einander kombinierten festen Metalle mit wenigen Ausnahmen (vgl. unten) innerhalb der beobachteten Temperaturgrenzen von 0°—400° C. nur von der ersten und zweiten Potenz der Temperatur abhängen, also ihre Thermospannungskurven Parabelstücke sind (vgl. Fig. 40), d. h. ihre thermoelektrischen Beschleunigungen konstant sind, so wird jedes Metall durch eine Gerade dargestellt.

2) Der Schnittpunkt irgend zweier dieser Geraden giebt den neutralen Punkt der zugehörigen Metallkombination, d. h. diejenige Temperatur in °C., bei welcher die thermoelektrische Geschwindigkeit zu Null wird, also der Maximalwert ihrer Thermospannung erreicht ist, z. B. für Eisen-Kupfer bei + 275° C. (vgl. *Fe-Cu* in Fig. 40).

3) Der bei einer bestimmten Temperatur von zwei Graden eingeschlossene Abstand in der Ordinatenrichtung giebt, im Ordinatenmassstab gemessen, die zu jener Temperatur gehörige thermoelektrische Geschwindigkeit der Metallverbindung, d. h. die Spannungsänderung in Volt bei der Temperaturänderung um 1° C., z. B. für *Fe-Cu* bei + 150° C. den Abstand 25·4 mm oder im Ordinatenmassstab 6·48 Mikrovolt (Volt · 10^{-6}), da 1 mm etwa 0·255 Mikrovolt; hiernach würde bei Erhöhung der Temperatur von 150° C. auf 151° C. die Spannung für ein Eisen-Kupfer-Element um $6·48 \,.\, 10^{-6}$ Volt zunehmen, wenn die gemeinschaftliche Temperatur der anderen Enden geringer als 150° C. ist.

4) Die Fläche, welche durch die zwei ihre zugehörigen Metalle charakterisierenden Geraden einerseits, durch zwei Temperaturgrenzen andererseits eingeschlossen wird, liefert ein Mass für die Gesamtspannung des Thermoelementes zwischen jenen Temperaturgrenzen. Da nämlich die der Ordinatenachse parallelen Grundlinien jedes Paralleltrapezes, welches von vier Geraden eingeschlossen wird, die Grenzwerte der thermoelektrischen Geschwindigkeiten $\left(\frac{dE}{dt}\right)$ darstellen, die Höhe des Trapezes aber durch $\int_{t_1}^{t_2} dt$ gebildet wird, d. h. durch das von den Temperaturgrenzen t_1 und t_2 bezeichnete Abscissenstück, so liefert die Fläche $\int_{t_1}^{t_2} \frac{dE}{dt}\,dt$ die Totalspannung, wobei nur auf die Einheiten der Spannungsflächen zu achten ist. Das Trapez kann, wie leicht ersichtlich, für den Grenzfall, dass die eine Temperatur der neutrale Punkt (t_m) ist in ein Dreieck, und bei Überschreitung desselben in ein Doppeldreieck übergehen, doch ist im letzteren Fall das zweite Dreieck jenseits des Schnittpunktes abzuziehen, so dass z. B. die Gesamtspannung E für

$$[Fe\text{-}Cu]_{+100}^{+300} = [Fe\text{-}Cu]_{+100}^{+275} - [Fe\text{-}Cu]_{+275}^{+300},$$

da t_m bei + 275. Die Spannung des letzteren Elementes in Volt für die Temperaturgrenzen + 20° C. und + 100° C. ergäbe sich wie folgt: durch Entnahme des Mittelwertes der thermoelektrischen Geschwindigkeit $\frac{dE}{dt}$ für diese Grenzwerte (am Ordinatenmassstab abgestochen) erhält man $\frac{52 + 36}{2} = 44$ mm (das ist derselbe Wert wie bei $\frac{100 + 20}{2} = 60°$ C.), also im Ordinatenmassstab 11·2 Mikrovolt (für 1° C.); die Gesamtspannung für 100 — 20 = 80° C. ist sonach 11·2 . 80 = 0·897 Millivolt; hingegen für die Temperaturgrenzen 0° C. und 100° C. = $\left(\frac{dE}{dt}\right)$ für 50° C. = $(Fe_{50} - Cu_{50})$ = 11·7 Mikrovolt, also

$$E \text{ für } [Fe\text{-}Cu]_0^{100} = 11{\cdot}7 \,.\, 100 = 1{\cdot}17 \text{ Millivolt.}$$

5) die Tangente des Winkels, welchen jede Gerade mit der Abscissenachse (dem Normalniveau Blei) einschliesst, bildet ein Mass für die thermoelektrische Beschleunigung k des durch die Gerade charakterisierten Metalles und beträgt z. B. für *Fe* in Volt für den Celsiusgrad gemessen analog der Fallbeschleunigung, welche etwa in Meter auf die Sekunde gemessen zu werden pflegt, $k_{Fe} = -\frac{13{\cdot}3}{307}$ Mikrovolt oder $-4{\cdot}34 \,.\, 10^{-8}$ Volt, wobei hier die Bestimmung aus dem bei 50° C. am Ordinatenmassstab zu 13·3 Mikrovolt gemessenen Wert und $(t_m - 50) = 307$ erfolgte, da der neutrale Punkt t_m für Eisen-Blei (*Fe-Pb*) bei 357° C. liegt, während das Vorzeichen die Abnahme mit wachsender Temperatur angiebt. Ebenso wäre für *Cu* das $k_{Cu} = + 0{\cdot}845 \,.\, (10^{-8}$ Volt). Dass für irgend eine beliebige Metallkombination, z. B. *Fe-Cu* die zugehörige thermoelektrische Beschleunigung durch die Differenz $k_{Fe} - k_{Cu} = -(4{\cdot}34 + 0{\cdot}845) = -5{\cdot}19 \,.\, 10^{-8}$ Volt gebildet wird, ist nach dem Vorausgegangenen unschwer zu übersehen. Graphisch findet sich dieser Wert wie folgt: eine beliebige Ordinate

$$y_x = \left[\left(\frac{dE}{dt}\right)^{Fe} + \left(\frac{dE}{dt}\right)^{Cu}\right]$$

als Grundlinie des von ihr mit der *Fe*-Geraden und der *Cu*-Geraden gebildeten Dreiecks wird durch die zugehörige Dreieckshöhe $[t_m]_{Fe}^{Cu} - x$ dividiert und so die thermoelektrische Beschleunigung zu $\frac{y_x}{t_m - x}$ erhalten.

Rechnet man diese thermoelektrischen Materialkonstanten k in der soeben angegebenen Weise für die übrigen Metalle aus, so erhält man für diese von Tait, Knott und Mac Gregor in den Jahren 1872—1878 in einer jetzt schwer verwendbaren Einheit bestimmten Werte (vgl. Wied. II, 382) folgende Zahlen[1]), wenn dieselben in die Einheiten 10^{-8} Volt umgerechnet werden.

1) Eine grössere Anzahl offenbarer Versehen in dieser Zahlentabelle, welche durch den direkten Widerspruch mit den Diagrammen ersichtlich sind, wurden auf Grund der letzteren verbessert.

Werte für k (thermoelektrische Beschleunigung in 10^{-8} Volt oder CGS-Einheiten:

	10^{-8} Volt		10^{-8} Volt		10^{-8} Volt
Eisen (Fe) . . .	— 4·34	Gold (Au) . . .	+ 0·915	Natrium (Na) . . .	— 3·75
Stahl	— 3·01	Kupfer (Cu) . .	+ 0·845	Kalium (K) . . .	— 1·18
Platin Pt (weich) .	— 0·985	Blei (Pb) . . .	0·00	Kobalt (Co) . . .	— 10·29
Pt Ni	— 0·985	Zinn (Sn) . . .	+ 0·493	Gaskohle	— 3·40
Pt hart	— 0·67	Aluminium (Al) .	+ 0·352	Nickel (Ni) bis	
Magnesium (Mg) .	— 0·845	Palladium (Pd) .	— 3.20	175° C.	— 4·58
Argentan	— 4·58	Ag Pd_{20}	— 1·38	Ni (250 bis 310° C).	+ 21·6
Kadmium (Cd) . .	+ 3·84	Ag Pd_{25}	— 2·26	Ni (> 340° C.) . .	— 4·58
Zink (Zn)	+ 2·15	Pt Jr_{6}	— 1·77		
Silber (Ag) . . .	+ 1·34	Pt Jr_{10}	— 0·38		

Unter Benutzung dieser Materialkonstanten kann man nun für zwei beliebige Metalle (p und n) zunächst $c = \frac{k_p - k_n}{2}$, dann mit Benutzung der Gleichung

$$E = (t_1 - t_2)\,[b \pm c\,(t_1 + t_2)]$$

die Thermospannung E für beliebige Metallkombinationen mit bekannten Werten von k berechnen, sobald noch b (die thermoelektrische Anfangsgeschwindigkeit) bekannt ist, oder, was unter Verwendung der Beziehung (vgl. oben)

$$\mp \frac{b}{c} = 2\, t_m$$

dasselbe besagt, sobald der neutrale Punkt t_m für dieselbe bekannt ist. Ist $b_0 = \left(\frac{dE}{dt}\right)_0$ die Anfangsgeschwindigkeit für die Temperatur t_0 bekannt, so folgt nach der obigen Gleichung für einen Temperaturunterschied der anderen Enden um t_1° C. in Übereinstimmung mit der Formel für die Wurfhöhe bezw. Fallhöhe H eines mit der Anfangsgeschwindigkeit v_0 senkrecht aufwärts bezw. abwärts geworfenen Körpers nach der Zeit t_1, nämlich

$$H = t_1 \cdot v \mp t_1^2 \cdot \frac{g}{2},$$

die Spannung

$$E = b_0 \cdot t_1 \pm t_1^2 \cdot \left(\frac{k_p - k_n}{2}\right),$$

z. B. für

$$\overset{100}{\underset{0}{[Fe\text{-}Cu]}} \text{ ist } b_0 = \frac{dE}{dt_0} = 14{\cdot}30 \text{ Mikrovolt (vgl. Fig. 41)},$$

sowie

$$c = \frac{k_p - k_n}{2} = 5{\cdot}19\,.\,10^{-8} \text{ Volt (vgl. oben)},$$

also $$E = (14{\cdot}30 \,.\, 100 \,.\, 10^{-6}) - \left(100^2 \,.\, \frac{5{\cdot}19}{2} \,.\, 10^{-8}\right)$$

$$E = 1{\cdot}43 \,.\, 10^{-3} - 0{\cdot}259 \,.\, 10^{-3} = 1{\cdot}17 \text{ Millivolt},$$

d. h. derselbe Wert, welcher oben aus der Spannungsfläche der diagrammatischen Darstellung erhalten wurde.

In ganz ähnlicher Weise kann man die Rechnung unter Benutzung der in der früheren Tabelle angegebenen Werte von t_m durchführen, welch letztere vielfach aber durch Extrapolation (Verlängerung der Geraden jenseits des Beobachtungsgebietes bis zum Schnitt) erhalten sind. Die Werte von b_0 oder einer anderen Anfangstemperatur können für je zwei Metalle der Tafel ohne weiteres entnommen werden oder ergeben sich rechnerisch mit Hülfe der Tabelle für t_m und derjenigen für k aus der Formel

$$\pm b_x = 2 \,.\, c \,.\, t_m = t_m\,(k_p - k_n)$$

$$\text{zu } \frac{dE}{dt_x} = b_x = (t_m - t_x)\,(k_p - k_n), \text{ z. B. für}$$

$$(Fe\text{-}Cu)_{50^0} = (265 - 50)\,(-4{\cdot}34 - 0{\cdot}845) = -11{\cdot}2 \,.\, 10^{-6} \text{ Volt}.$$

Wegen der weit ausserhalb liegenden Werte von Kobalt und Nickel sind dieselben auf einer kleineren Nebentafel mit verändertem Massstab, der aber mit Hülfe der beigefügten Metalle aus der grossen Tafel leicht an diese anzuschliessen ist, beigefügt; hier ist auch die sonderbare Knickung bei Nickel graphisch dargestellt, welche von Tait auch noch in Verbindung mit anderen Unregelmässigkeiten bei einigen anderen Kombinationen (z. B. Eisen mit Platiniridiumlegierung) beobachtet wurde (vgl. Wied. II, 386). Zur Erklärung hat man dieselben in Verbindung mit Perioden grösserer und geringerer Härte der Metalle gebracht (vgl. Wied. II, 389), welche sich in diesen Fällen nicht allmählich, sondern mehr sprungweise ändern soll, ähnlich wie bei der eigentümlichen von Gore am Eisen beobachteten Rekalescenzerscheinung zwischen Weissglut und Hellrotglut. Die Untersuchung der thermoelektrischen Kraft bei schmelzenden oder erstarrenden Metallen zeigten jedoch bei anderen untersuchten Metallzusammenstellungen keinen merklichen Sprung in derselben (vgl. Wied. II, 390).

94. Elektrothermometer. Verhalten flüssiger Legierungen.

Die Platiniridium- und Platinrodium-Legierungen eignen sich in Verbindung mit reinem Platin wegen ihrer Schwerschmelzbarkeit wohl gegenwärtig am besten zur thermoelektrischen Messung hoher Temperaturen. So soll (vgl. Wied. II, 376) für ein Element aus Platin einerseits, 10% Platinrodiumlegierung (Platin mit 10% Rhodium) andererseits sich die Temperatur t in Celsiusgraden zwischen 400 und 1440° durch folgende Gleichung dritten Grades ergeben, wenn die gemessene Spannung E in Mikrovolt (10^{-6} Volt) eingesetzt und die äusseren (kalten) Enden auf 0° C. gehalten werden:

$$t = 13{\cdot}76\,E - 0{\cdot}004\,841\,E^2 + 0{\cdot}000\,001\,378\,E^3$$

und zwar sowohl bei aufsteigender als absteigender Temperatur. Nach anderen Beobachtungen scheint aber die Benutzung von Thermoelementen zur Temperaturmessung nur mit grosser Vorsicht anwendbar zu sein, da ab-

gesehen von sonstigen Störungserscheinungen bei aufsteigender und absteigender Temperatur merkliche Unterschiede bemerkt wurden, sowie auch bei Eisen-Kupfer-Elementen eigentümliche, den magnetischen Hysteresiserscheinungen nicht unähnliche Verzögerungen in den Änderungen der Spannungen beobachtet wurden (vgl. WIED. II, 363). Eingehendere Untersuchungen über die für hohe Temperaturen offenbar am besten geeigneten Kombinationen von Platin mit Platiniridium oder Platinrhodium sind von C. BARUS (vgl. die physikalische Behandlung und die Messung hoher Temperaturen, Leipzig, J. H. BARTH, 1892) angestellt worden.

Während bei den festen Legierungen meistens die Formulierung von AVENARIUS hinreichend genau das Verhalten ausdrückt, scheint dies für die flüssigen Legierungen nicht der Fall zu sein (vgl. WIED. II, 391); viel-

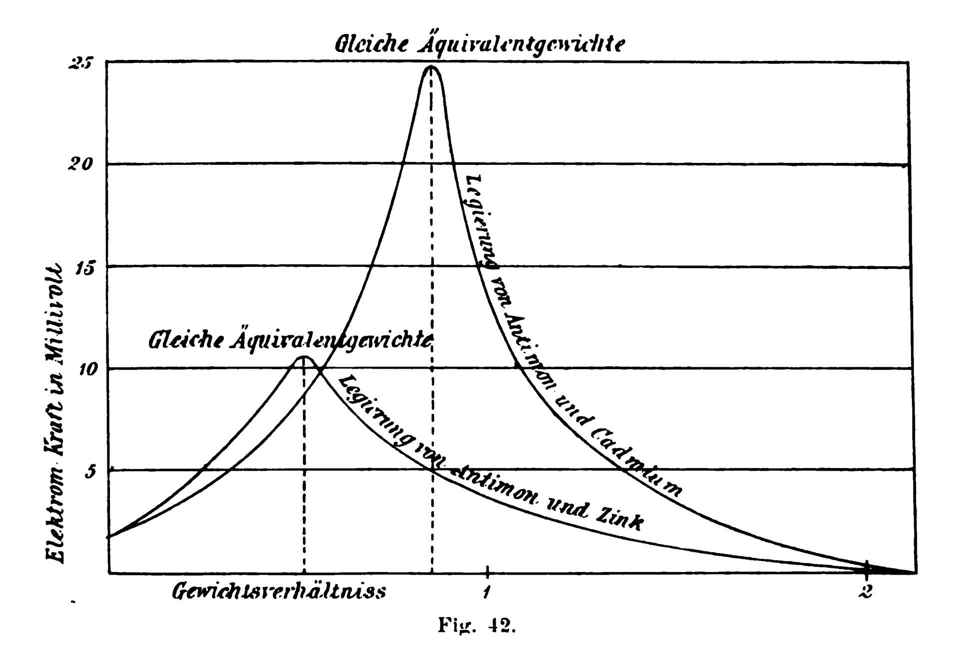


Fig. 42.

mehr weisen dieselben vorläufig nicht gut formulierbare Unregelmässigkeiten in dem Zusammenhang zwischen Spannung und Temperatur auf.

Zwischen bestimmten Temperaturgrenzen, z. B. 0 und 100° C., weist hingegen die Abhängigkeit der Spannung von der prozentualen Zusammensetzung der Legierung für viele Fälle (nach Untersuchungen von E. BECQUEREL) einen ausgezeichneten Wert für gleiche Äquivalentgewichte auf, wie Fig. 42 in den Maximalwerten der Spannung bei Antimon-Zink- und Antimon-Kadmium-Legierung gegen Kupfer als zweites Metall andeutet, wo für die Temperaturgrenzen 0 und 100° C. die Spannung E in Millivolt abhängig vom Legierungsverhältnis

$$\frac{\text{Antimon}}{\text{Zink}} \text{ bezw. } \frac{\text{Antimon}}{\text{Kadmium}}$$

(als Abscisse) aufgetragen ist.

95. Thermoelektrische Stellung der me-

Neben den bisher behandelten Erscheinungen der thermoelektrischen Spannungserregung, welche zwar mancherlei Schwankungen durch nicht genau kontrollierbare Beschaffenheit des Materials unterworfen sind, aber

chanisch beanspruchten Metallen.

doch noch eine quantitative Behandlung, sowie damit in Zusammenhang gesetzmässige Formulierungen zulassen, giebt es auf diesem Gebiet ähnlich wie auf den beiden vorausgegangenen ausserdem eine grosse Zahl von Beobachtungen, welche kaum qualitative Feststellungen ermöglichen, weil die Voraussetzungen zu den beobachteten Spannungserregungen keine hinreichende Präzisierung zulassen, so dass die Unsicherheit oder zum mindesten Unbestimmtheit ihnen noch keinen sicheren Platz im Rahmen der Wissenschaft zukommen lässt. Auf Grund der sich mehrfach widersprechenden Beobachtungen verschiedener Forscher ist eine sichere Entscheidung über den allgemeinen Wert solcher Beobachtungen oft erschwert.

Der Einfluss der „Struktur“ verhältnisse bei den Materialien auf die Erregung von Thermospannungen wurde bereits in **91** erwähnt. In Übereinstimmung hiermit sind denn auch Thermospannungen bezw. Ströme zwischen chemisch gleichen Materialstücken vielfach beobachtet worden (vgl. Wied. II, 342—361), wenn das eine von ihnen einen anderen Härtegrad, sei es durch vorausgegangene Bearbeitung oder thermische Behandlung aufweist, ferner, wenn dasselbe während der mit Temperaturunterschied verbundenen Berührung mit dem andern dem Einfluss einer Dehnung oder Pressung ausgesetzt ist, endlich wenn es andere Schichtung, ja nur verschiedene Dicke besitzt, oder die beiden Kontakte in abweichender Art hergestellt werden, ja sogar, wenn die beiden gleichen Metalle vor der Berührung nur verschieden warm waren (vgl. Wied. II, 395 u. ff.), d. h. schliesslich in einem Stromkreis mit stellenweise einander berührenden Leitungsstrecken bei Erwärmung einer Stromkreisstrecke (Drahtstückes) über die Temperatur der übrigen. Auch hier ergiebt sich, dass man vor mehr oder weniger rasch vorübergehenden, unbeabsichtigten, ja bei Messungen sogar oft recht störenden Thermospannungen nur selten sicher ist und dass dieselben von nahezu gleicher Allgemeinheit sind, wie die reibungs- und berührungselektrischen Spannungserregungen (vgl. **80** und **82**). Aus den zahlreichen hierhergehörigen Beobachtungen — grösstenteils ohne allgemeineres Interesse — seien die Feststellungen von W. Thomson (vgl. Wied. II, 356) über beobachtete Thermospannungen angeführt:

Eisen	elektrische Spannung an der erwärmten Berührungsstelle in Richtung
temporär gedehnt,	vom nicht gedehnten zum gedehnten,
permanent gedehnt,	„ gedehnten zum nicht gedehnten,
temporär transversal zusammengedrückt,	„ nicht gedrückten zum gedrückten,
permanent transversal zusammengedrückt,	„ gedrückten zum nicht gedrückten,
permanent achsial gepresst,	„ nicht gepressten zum gepressten,
hart durch Ablöschen,	„ abgelöschten zum angelassenen,
„ „ Tordieren,	„ tordierten zum weichen,
Kupfer	
temporär gedehnt,	vom gedehnten zum nicht gedehnten,
hart durch Ablöschen,	„ angelassenen zum abgelöschten,
„ „ Tordieren.	„ weichen zum tordierten Teil.

Bei der oben erwähnten Spannungserregung durch Berührung verschieden warmer Metalldrähte spielt die Bildung von Oberflächenschichten offenbar eine

grössere Rolle und die Oxydschichten scheinen thermoelektrisch besonders wirksam zu sein (vgl. WIED. II, 400). Gleichzeitig ist dies aber auch eine Stelle, wo eine scharfe Trennung zwischen Berührungsspannung und Thermospannung oft nicht mehr durchzuführen ist. In noch höherem Grade gilt dies von den Beobachtungen über Thermospannungen zwischen Metallen und Elektrolyten (WIED. II, 412 bis 430) und zwischen Elektrolyten (WIED. II, 431 bis 436), wo es ganz unsicher erscheint, ob man die beobachtete Spannung oder Spannungsänderung als Thermospannung aufzufassen hat, oder als Folge der Änderung des chemischen Verhaltens mit der Temperatur.

Von den letztgenannten zahlreichen Beobachtungen gilt das Gleiche wie von einer grossen Reihe von Einzelbeobachtungen über die zwischen metallischen Leitern auftretenden Thermospannungen. Ein Teil der mitgeteilten Werte scheint zweifelhaft oder zum mindesten ohne weitere Bedeutung, weil die chemischen oder physikalischen Materialeigenschaften nicht hinreichend definiert sind; der Rest aus dem bisherigen grossen Haufen von Thatsachenmaterial harrt noch der Sichtung und eines Forschers, der durch Auffindung eines leitenden Gedankens eine gewisse zusammenfassende Einordnung der vereinzelten und vorläufig nur geringen wissenschaftlichen Wert besitzenden Beobachtungen bewirkt.

96. Erklärungsversuche und Thomson-Erscheinungen.

Es hat natürlich auch nicht an Versuchen gefehlt, die thermoelektrischen Erscheinungen zwecks weiterer „Erklärung" mit anderen Materialeigenschaften in Verbindung zu bringen, so vor allem mit dem elektrischen Widerstand. Obwohl nun das in vielen Fällen vorhandene Parallellaufen zwischen den Werten des Widerstandes und der thermoelektrischen Spannungskoeffizienten auf einen gewissen Zusammenhang hinzuweisen scheint, so ist doch die Auffindung einer durchgreifenden Beziehung zwischen beiden noch nicht gelungen. Ein gewisses Interesse verdient der hiermit nahe verwandte, nur gleichsam eine Umkehrung darstellende Versuch von C. LIEBENOW, eine Theorie des elektrischen Widerstandes der Metalle auf thermoelektrischem Wege aufzustellen (vgl. „Der elektrische Widerstand der Metalle" bei W. KNAPP, Halle a. S., bezw. ETZ 1898, 28, ferner II. I, 2 in 222).

Andere Versuche, wie derjenige von BACHMETJEW, die Thermospannungen mit den Molekulargewichten in Zusammenhang zu bringen (vgl. Wk. IIIa, 405), besitzen auch noch zu stark hypothetischen Charakter, um sie hier zu behandeln.

Nahverwandte Beziehungen besitzen die thermoelektrischen Spannungen mit den sogenannten PELTIER- und THOMSON-Erscheinungen[1]) dar; obwohl als wertvolle Umkehrungsbeziehungen zu der thermoelektrischen Spannungserregung aufzufassen, sollen dieselben doch erst beim elektrischen Ausgleich näher betrachtet werden, da sie durch den elektrischen Strom bewirkt werden und in engerem Zusammenhang mit energetischen Überlegungen stehen.

Nach der ersten Niederschrift dieses Abschnittes sind neue Beobachtungen, sowie Untersuchungen theoretischer Natur über Thermoelektrizität veröffentlicht worden (ETZ 1900, 246 und 619), welche eine engere Verbindung mit anderen Materialkoeffizienten aufzudecken scheinen. Die mehr theoretischen Unter-

1) Die in der Physik gebräuchliche Bezeichnung „-Effekt" für einige in neuerer Zeit aufgefundenen Erscheinungsgruppen wurde hier vermieden wegen der anderweitigen Bedeutung des Wortes Effekt in der Technik.

suchungen von C. LIEBENOW (ETZ 1900, 246) knüpfen an die Hypothese von F. KOHLRAUSCH an, dass die von uns beobachteten Thermospannungen nur Differenzerscheinungen der Thermo-EMK sind, welche ihren Sitz im Innern des Leiters selbst haben. Die Lötstellen würden hiernach nur eine untergeordnete Bedeutung besitzen, während der elektrische Strom ebenso wie seine Ursache, die Spannung, im engsten Zusammenhang mit dem im Leiter fliessenden Wärmestrom ständen und nur noch von der Natur (dem Material) des Leiters abhängen. Die auf Grund dieser von LIEBENOW weiter verfolgten Theorie der Thermoelektrizität berechneten Thermospannungen stimmen wenigstens für alle nichtmagnetischen Metalle so angenähert[1]) mit den wirklich beobachteten überein, dass die unten angegebene Beziehung jedenfalls Beachtung verdient. Auf Grund energetischer Betrachtungen wird die Wärmeströmung in Leitern von der wärmeren zur kälteren Stelle mit der Umsetzung in elektrische Energie in Form von elektrischer Strömung in Beziehung gebracht. Als Ausgangspunkt dient die Vorstellung, dass die gemessene oder beobachtete Thermospannung zwischen den kalten Enden zweier verschiedener Leiter eine Differenzwirkung darstellt, indem die Wärmeströmung innerhalb jedes Einzelmetalles von einer bestimmten, aber in jedem Leiter verschiedenen Thermospannung für eine bestimmte Temperaturdifferenz, z. B. 1° C. zwischen je zwei Schichten begleitet ist. Mit Hülfe der Energiegleichung ergiebt sich, dass diese Thermospannung jedes Einzelleiters den Betrag

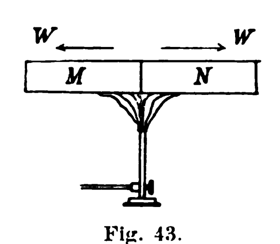


Fig. 43.

$$E = \pm 2{\cdot}04 \sqrt{\frac{R \cdot L}{T}},$$

wenn R den spezifischen elektrischen Leitungswiderstand des Metalles oder allgemeiner Leitermaterials, L sein (inneres) Wärmeleitungsvermögen und T die absolute Temperatur bedeutet. Das Vorzeichen bestimmt sich nach LIEBENOW gemäss der Beobachtung dahin, dass bei allen Nichtmetallen (N in Fig. 43) Richtung des Wärmestromes (W) und Richtung der EMK nach der gegenwärtig üblichen Richtungsannahme (aussen von + nach —, innen von — nach +) zusammenfallen, bei allen Metallen (M in Fig. 43) hingegen einander entgegenlaufen. Unter Einsetzung der Faktoren, von denen die Werte L noch am wenigsten zuverlässig zu sein scheinen, findet LIEBENOW bei Kupfer 137·5 Mikrovolt für 1° C. und bei Eisen 128. Nach seiner Theorie wäre sonach die zu erwartende Thermospannung für ein Eisen-Kupfer-Element die Differenz beider Werte, d. h. 137·5 — 128 = 9·5 Mikrovolt pro 1° C., was angenähert mit der wirklich beobachteten Spannung stimmt. Die übrigen Kombinationen haben in den meisten Fällen eine mit Rücksicht auf die Unsicherheit von L befriedigende Übereinstimmung[1]) gezeigt, nur die magnetischen Metalle weisen einige Abweichungen auf.

Wichtiger als diese theoretischen Betrachtungen scheinen folgende experimentellen Beobachtungen neuesten Datums (vgl. ETZ 1900, 619: EGG-SIEBERG: „Über thermoelektrische Ströme") zu sein. Sie lassen eine grosse

1) Auf Grund einer neueren Kritik der von LIEBENOW benutzten Zahlen für das Wärmeleitungsvermögen (vgl. Ph. Z. 1, 546) erscheinen allerdings die Schlussfolgerungen von LIEBENOW etwas zweifelhaft.

Zahl der vorerwähnten ungeklärten Einzelbeobachtungen in einem so neuen Lichte erscheinen, dass hierdurch ein gänzlich neuer Standpunkt für die Behandlung der thermoelektrischen Erscheinungen gefunden zu sein scheint. Ja, der Verfasser von H. I, 1 ist geneigt zu glauben, dass die hier gemachten und unten kurz angeführten Beobachtungen den bisher vergeblich gesuchten Schlüssel für die tiefer liegende Erkenntnis des ganzen Gebietes bieten dürften. Namentlich scheinen sie auch berufen, die bisher noch recht dunkle THOMSON-Erscheinung („Effekt") aufzuhellen und die von LE ROUX hierfür gefundenen Zahlen (vgl. unten) zu deuten. Die Beobachtungen von EGG-SIEBERG sind folgende:

In Fig. 44 sollen AB und CD zwei hinreichend lange und dünne Eisendrähte vorstellen, so dass bei Erhitzung des einen Endes die Temperatur des anderen Endes praktisch nicht geändert wird: also bei Erhitzung von C auf Rotglühhitze soll D auf Zimmertemperatur, z. B. $T = 290^0$ (absolute Temperatur) bleiben und das Temperatur g e f ä l l e durch das darüber befindliche Diagramm dargestellt sein. Sind jetzt die Enden von A und D durch ein Galvanometer geschlossen und wird das auf Rotglut erhitzte Ende C mit dem kalten

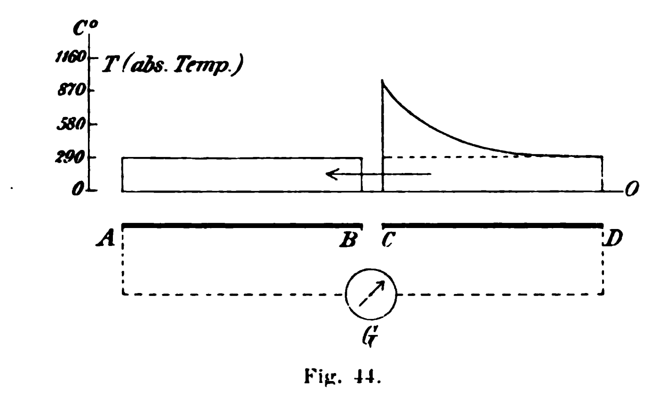


Fig. 44.

Ende B in Berührung gebracht, so fliesst u n m i t t e l b a r n a c h der Berührung ein Strom von C nach B, d. h. in der Pfeilrichtung des Temperaturdiagramms oder mit anderen Worten i n R i c h t u n g d e s s t e i l e r e n Temperaturg e f ä l l e s. Bei Kupferleitern war der Strom entgegengesetzt, d. h. von B nach C gerichtet. Hieraus folgt zunächst der wichtige und bezüglich der Rolle des Temperaturg e f ä l l e s neue Erfahrungssatz: „In einem ungleich erwärmten Leiter herrschen elektromotorische Kräfte, deren Richtung und Grösse abhängig ist von der Natur des Leiters u n d von den vorhandenen T e m p e r a t u r g e f ä l l e n".

In jedem homogenen Leiter desselben Metalles müsste hiernach eine wirksame Thermo-EMK hervorgerufen werden können, deren Grösse von der U n g l e i c h h e i t der Temperaturgefälle nach beiden Seiten von der maximal erwärmten Stellen aus abhängt. Dass thatsächlich die beiderseitige Verschiedenheit des Temperaturgefälles die Grundursache bildet, wurde durch folgende Variationen der Versuchsanordnung bestätigt (vgl. a. a. O., 620):

Lassen wir beispielsweise in ein mit Wasser gefülltes Gefäss A (Fig. 45 a) einen dünnen Eisendraht B eintauchen, der mit dem Galvanometer G einen geschlossenen Stromkreis bildet, und erwärmen wir die Eintrittsstelle D durch eine Stichflamme E, so

zeigt das Galvanometer in der That einen Strom an, und zwar verläuft derselbe in der Richtung DFG, d. h. wiederum in der Richtung des grösseren Temperaturgefälles. Wird die Eintrittsstelle F erhitzt, so kehrt sich die Stromrichtung um.

Anstatt die dauernde Ungleichheit der Temperaturgefälle durch einseitige stärkere Wärmeentziehung hervorzurufen, kann man diese Ungleichheit auch durch Relativbewegung erzielen. Bewegen wir die Wärmequelle B (Fig. 45b) in der Pfeilrichtung[1]) längs des Leiters A, so wird in der Bewegungsrichtung das Wärmegefälle durch die Annäherung der Wärmequelle vergrössert, während dasselbe nach der entgegengesetzten Seite hin abgeflacht wird. Es wird daher, solange die Bewegung von B dauert, eine wirksame Thermo-EMK erzeugte, welche einen Strom hervorruft, der beispielsweise im Eisenleiter mit der Bewegungsrichtung der Wärmequelle verläuft.

Diese Versuche erscheinen dem Verfasser von H. I, 1 für das thermoelektrische Erscheinungsgebiet — ähnlich wie auf dem Gebiete der magnetelektrischen Induktion durch FARADAY die Reduzierung aller Erscheinungen auf das Schneiden von magnetischen Kraftlinien — so fundamental, dass ein

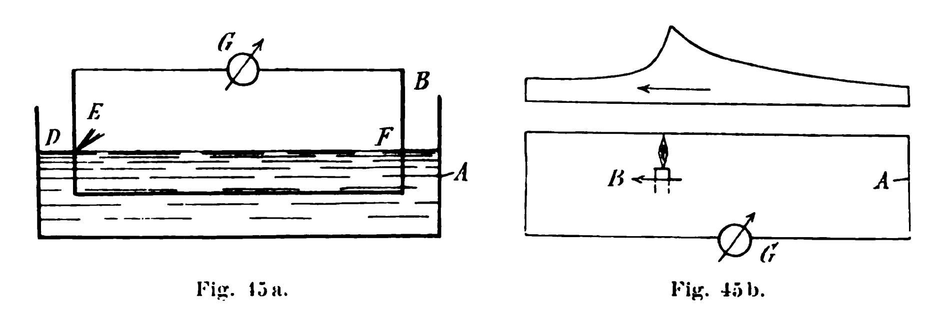


Fig. 45a. Fig. 45b.

nachdrücklicher Hinweis geboten erschien. Die zahlenmässige Grösse der erzielten Thermospannung, welche naturgemäss ausser vom Drahtmaterial von der Dicke, d. h. den Wärmeausstrahlungsverhältnissen des Drahtes und der Geschwindigkeit v von B (vgl. Fig. 45b) abhängt, ergab sich für Eisendraht von 0·3 mm Durchmesser und $v = 5$ mm pro Sekunde zu etwa 0·94 Millivolt.

Hierdurch erhalten auch die von LE ROUX gefundenen Zahlenwerte für die bisher ziemlich dunkle THOMSON-Erscheinung („THOMSON-Effekt") erhöhtes Interesse. LE ROUX hatte zwecks Bestätigung der Untersuchungen von W. THOMSON (vgl. **33**) durch Leiter von verschiedenem Material aber gleicher Länge und gleichem Temperaturgefälle einen Gleichstrom von konstanter Stärke geschickt und die hierbei sich ergebenden „Wärmetransporte", d. h. die in den Leitern auftretenden Wärmeänderungen in willkürlichem Mass gemessen und hierbei für den „THOMSON-Effekt" bei einer mittleren Temperatur der Leiter von etwa 50° C., d. h. die Enden einerseits

1) In dem Originalartikel ist für das gezeichnete Temperaturgefälle die Pfeilrichtung, d. h. die Bewegungsrichtung der Flamme B verkehrt angegeben, was auf einem Versehen beruht; wovon sich der Verfasser auch durch Nachprüfung des Experimentes überzeugte. Aus diesem Grunde trifft auch die daselbst gegebene Motivierung mit der Hemmung der Wärmeausstrahlung nicht zu.

in siedendem Dampf, andererseits in schmelzendem Eis folgende Zahlen gefunden (vgl. Wk. IIIa, 393)

Wismut, rein	— 31	Messing	+ 0·3
Eisen	— 31	Kupfer	+ 2
Neusilber	— 25	Silber	+ 6
Antimonlegierung nach Becquerel (1 Teil Sb, 1 Teil Cd u. ca. 20 % Bi)	— 24	Aluminiumbronce (ca. 10 % Al)	+ 6
Platin	— 18	Zink	+ 11
Aluminium	— 0·1	Kadmium	+ 31
Zinn	— 0·1	Antimon (käuflich)	+ 64
Blei	unmerklich	Wismutlegierung nach Becquerel (10 Teile Bi und 1 Teil Sb)	+ 73

Nach EGG-SIEBERG giebt diese Tabelle unmittelbar ein Bild über Richtung und Grösse der thermoelektrischen Kräfte bei gleichem Temperaturgefälle in den verschiedenen Leitern. In Übereinstimmung mit den vorstehenden Versuchen folgt hieraus, dass die Richtung der Thermo-EMK nicht durch die Richtung des steileren Temperaturgefälles gegeben, sondern von der Natur des Leiters abhängig ist.

Im gewissen Sinne kann man die Beobachtungen von EGG-SIEBERG bei der Erzeugung eines nach beiden Seiten verschiedenen Temperaturgefälles als eine Art Umkehrung der Thomsonerscheinung auffassen. Aber erst durch den Nachweis dieser Umkehrung und die Beleuchtung und Aufstellung dieser Erscheinungen von der anderen Seite nehmen dieselbe eine für unsere Vorstellung greifbarere und einheitlichere Gestalt an.

4. Spannungserregung durch Änderung des magnetischen Feldes. (Induktionselektrizität.)

97. Feldwirkung nach Faraday und Gesetz von Weber.

In der geschichtlichen Entwickelung (vgl. 19) wurde die Auffindung dieser gegenwärtig wichtigsten Erregungsursache durch FARADAY behandelt, ebenso die von ihm vorgenommene systematische Feststellung der wichtigsten Grundthatsachen durch das Experiment. Hiernach ist die Erregung elektrischer Spannung in einem Leiter nachweisbar:

1) wenn derselbe sich quer durch ein magnetisches Feld bewegt, möge dasselbe von einem permanenten Magneten, einem Elektromagneten, einem Stromleiter ohne Eisen, oder schliesslich auch von der Erde herrühren;

2) wenn ein solches Feld sich gegen den ruhenden Leiter bewegt;

3) ohne relative mechanische Bewegung des Leiterkreises, dem jener Leiter als Teil angehört, und des mit ihm verketteten magnetischen Kreislaufes (Feldes), wenn dieser magnetische Kreislauf eine quantitative Änderung erfährt, sei es durch Veränderung der MMK bei konstantbleibendem magnetischen Widerstand des magnetischen Kreislaufes, sei es durch Veränderung des magnetischen Widerstandes bei konstantbleibender MMK.

Es wurde gleichfalls bezüglich der Auffassung dieser vielseitigen Erscheinungen an anderer Stelle (vgl. **31**) angedeutet, dass sich FARADAY noch ein ganz besonderes Verdienst für unsere heutige einheitliche Auffassung und Formulierung des ganzen Gebietes erwarb. Dies geschah durch Ausbildung der Kraftlinienvorstellung, wenngleich dieselbe lange Zeit von der allgemeinen Wissenschaft fast unbeachtet blieb und selbst nach ihrem mathematischen Ausbau durch MAXWELL nur ein kümmerliches Dasein neben den auf die Fernwirkungstheorie gegründeten Formulierungen fristete. Erst von der Elektrotechnik in ihrer Bedeutsamkeit erkannt und allgemein benutzt, nahm sie schliesslich ihren Siegeslauf auch durch alle beteiligten physikalischen Gebiete und kann heute als alleinige Herrscherin angesehen werden. Letzteres wurde namentlich durch folgenden Umstand vorbereitet: Die an das COULOMBsche Gesetz $\left(f = \frac{m' \cdot m''}{l^2}\right.$ vgl. **7**$\left.\right)$ anschliessende und auf sogenannte Fernwirkung aufgebaute Formulierung von W. WEBER — nach welcher die Kraftwirkung f zwischen zwei von den strömenden Elektrizitätsmengen m' und m'' (in der Zeiteinheit) durchflossenen Leiterelementen in der gegenseitigen Entfernung l durch

$$f = \frac{m' \cdot m''}{l^2}\left[1 - \frac{a^2}{16}\left(\frac{dl}{dt}\right)^2 + \frac{a^2}{8}\, l\, \frac{d^2 l}{dt^2}\right]$$

gegeben ist, falls a eine reciproke sehr grosse Geschwindigkeit —, wurde von HELMHOLTZ (1870) ab absurdum geführt. Das Bedürfnis, dem Zwischenmedium für alle elektromagnetischen Erscheinungen und namentlich auch für diejenigen der „Induktionselektrizität“, nicht nur die einfache Entfernungseigenschaft, sondern auch einen bestimmten magnetischen Charakter oder Zustand zuzuschreiben, befriedigt die Kraftlinienvorstellung auch in quantitativer Hinsicht in so hohem Masse, dass mit ihrer Hülfe die Formulierung der Spannungserregung auf diesem Gebiet sich denkbar umfassend und einfach gestaltet. Dies gilt für die verschiedenartigsten Fälle der „Induktion“: Möge das magnetische Feld durch permanente oder Elektromagnete oder durch stromdurchflossene Leiter erzeugt werden, der induzierte Leiterkreis irgendwie gestaltet sein, die Feldänderung im letzteren durch relative mechanische Bewegung von bewegtem Feld gegen ruhenden Leiter oder umgekehrt, oder endlich bei mechanischem Ruhen beider Faktoren durch Variation des felderregenden Stromes oder Variation des magnetischen Kreislaufwiderstandes erfolgen — stets wird mit Zuhülfenahme der magnetischen Kraftlinien (richtiger Induktionslinien bezw. -röhren vgl. **63**) eine nicht nur qualitative, sondern auch quantitative Formulierung für die erregte Spannung in der Weise möglich sein, dass man dieselbe direkt proportional mit der Kraftlinien*änderung* innerhalb des Leiterkreises setzt.

Um diese ganz allgemeine Gleichung

Elektrische Spannung = Kraftlinien*änderung* im Leiterkreis

richtig auf die sehr mannigfaltigen Einzelfälle übertragen, d. h. aus ihrer abstraktesten Form in die konkretere des Bedarfsfalles umformen zu können, bedarf es allerdings zunächst einer genauen Feststellung der verschiedenen Modifikationen des Spannungbegriffes, sowie auch einer genaueren Präzisierung dessen, was in zweifelhafteren Fällen unter Leiter-

kreis zu verstehen ist, und wie die Zählung der Kraftlinienänderung zu erfolgen hat. Ist diese Festlegung aber erfolgt, so gestattet diese einfache Formulierung als Ausgangsgleichung eine praktisch genauere Bestimmung und Vorausberechnung der hier betrachteten Spannungserregung als bei den drei übrigen, vorausgegangenen Ursachen der Spannungserregung. Im vorliegenden Falle treten die undefinierbaren materiellen Momente mehr in den Hintergrund, welche unter dem Namen „Struktur", Verunreinigung, Oberflächenbeschaffenheit und dergleichen bei den vorangegangenen Ursachen der Spannungserregung eine so grosse Rolle spielen, dass alle quantitativen Zahlenangaben für die Spannung und damit deren Vorausbestimmung nur einen mehr oder weniger ungefähren Charakter tragen. Allerdings verschwinden sie auch hier nicht ganz, wie z. B. die magnetischen Materialkoeffizienten für die Felderzeugung unter Zuhülfenahme von Eisen zeigen. Für die Spannungsgrösse im induzierten Leiterkreis selbst ist aber das Material des Leiters und damit auch seine chemische bezw. physikalische Beschaffenheit völlig gleichgiltig, wie das Experiment alsbald ergab, und nur rein mechanische Faktoren wie seine Lage, Dimensionen und Bewegung sind von Einfluss.

98. Modifikationen des Spannungbegriffes.

Die verschiedenen Modifikationen des Spannungbegriffes, deren Unterscheidung für den vorliegenden Fall der Spannungserregung notwendig wird, machen zunächst ein vergleichsweises Heranziehen der Verhältnisse bei den vorausgegangenen Ursachen wünschenswert. Bei diesen konnte man wegen der relativen Beständigkeit des elektrischen Druckes mit der Zeit von der Komplizierung der primären elektrischen Thatsache (elektrischer Druck, Spannung, EMK), wie sie für die vorliegende Erregungsursache unerlässlich wird, praktisch absehen. Die etwaigen Spannungsänderungen, welche durch störende Einflüsse, wie z. B. Polarisation bei elektrochemischen Elementen, oder Inkonstanz der Temperaturdifferenz bei thermoelektrischen Elementen veranlasst sind, werden in allen praktisch wichtigeren Fällen nur zeitlich sehr allmählich verlaufen.

Setzt man fest, dass die Bezeichnung elektrische Spannung die allgemeinste und umfassendste Bedeutung jener obersten elektrischen Thatsache haben soll, so teilt sich dieselbe zunächst bei zeitlicher Konstanz in folgende Unterbegriffe. Die elektrische Spannung E, welche an den Umsetzungsstellen aus einer nichtelektrischen Energieform in elektrische erzeugt wird, ist bei Vorhandensein eines elektrischen Ausgleiches in Form der Gleichstromstärke J durch die Energiegleichung

$$E \cdot J = W$$

definiert, wenn W die in elektrische umgewandelte Nettoleistung der anderen Energieform angiebt; diese Spannung wurde als „Elektromotorische Kraft" EMK des Stromkreises (Leiterkreises) bezeichnet und stellt das Maximum der im Leiterkreis auftretenden Spannung dar. Hiermit war gedanklich eine Zerlegung des ganzen Kreislaufes in zwei gegensätzliche Gebiete verbunden: einerseits in den gewissermassen aktiven oder (Spannung) produzierenden Kreislaufteil, andererseits in den Restkreislauf, welcher dieser Spannung gleichsam passiv, oder genauer dieselbe konsumierend, gegenübersteht, d. h. elektrisch-kinetische Energie in irgend eine andere Energieform umsetzt. Hierbei muss der letztere notwendig elektrische Spannung E

aufzehren oder „verschwinden“ lassen, da in der obigen Gleichung W nur dann einen endlichen Wert haben kann, wenn jeder der beiden Faktoren (E und J) endlich ist.

Diese Zerfällung des Spannungswertes, der sich bei Integration über den ganzen geschlossenen Kreislauf stets zu Null ergiebt (Nullform der Spannungsgleichung), in diese beiden gleichgrossen gegensätzlichen Spannungen lag für den praktisch zuerst wichtigen Fall des galvanischen (chemoelektrischen) Elementes sehr nahe. Hier ist die (aktive) Spannungserregung auf Querschnitte von ausserordentlich geringer Dicke und praktisch verschwindendem elektrischen Widerstand beschränkt, während der Leiterkreis in seiner vollen Länge als Spannung verzehrend aufgefasst werden konnte. Es wurde hierbei aber eine Zerlegung in inneren und äusseren Widerstand des Stromkreises notwendig, von denen jener innerhalb, dieser ausserhalb der letzten zur Spannungserregung beitragenden (aktiven) Querschnitte lag. Für den Fall der Stromlieferung der „Elektrizitätsquellen“ (Elemente oder Batterien) wurde hierdurch eine Unterscheidung der der Messung zugänglichen sogenannten Klemmenspannung von dem Maximalwert der als „Triebkraft“ oder EMK aufgefassten Spannung erforderlich, da die letztere während der Stromlieferung einer unmittelbaren Messung nicht unterworfen werden konnte.

Diese Unterscheidung wird auch für alle übrigen Spannung erregenden Vorrichtungen beibehalten, also auch für den Fall der Spannungserregung durch Änderung des magnetischen Feldes (Dynamos). Bei diesen erstreckt sich aber der Sitz der Spannungserregung über grosse Leiterstrecken, welche unter Umständen die rein konsumierenden übertreffen können. Jene Trennung erscheint daher nicht so naheliegend und naturgemäss als in dem obigen Fall, welcher jene begriffliche Trennung zuerst veranlasst, insofern die Doppelstellung der induzierten Kreislaufstrecke als gleichzeitig produzierend und konsumierend die begriffliche Scheidung gegenüber dem ursprünglichen Fall etwas erschwert. Die Vorteile dieser Unterscheidung in überhaupt im Leiterkreis erregte Spannung oder EMK und verfügbare Spannung oder messbare Klemmenspannung sind aber trotz erschwerender Begleitumstände, wie Rückwirkung des stromdurchflossenen Leiterfeldes auf das Primärfeld u. s. w., so gross dass sie auch hier allgemein gebräuchlich ist. Durch gedankliches Fortschreiten längs des Leiterkreises ist gemäss dem Ohmschen Gesetz eine (räumliche) Zerlegung der Gesamtspannung in beliebig kleine Teilspannungen gegeben. Für die chemoelektrische Erregung trifft dies allerdings wegen der geringen und sehr unsicheren Dicke der „Doppelschichten“ (vgl. 87) zunächst nur für den konsumierenden Teil zu, und diese Spannungszerlegung durch Teilung der Leiterstrecken längs der Stromrichtung lässt erst bei der Erregung mittels Feldänderung eine Ausdehnung auf die Spannung produzierenden Teile des Kreislaufes (EMK) zu. Der zeitliche Einfluss machte jedoch für die Erreger von praktisch konstanter Spannung (EMK) und stationäre Verhältnisse keine weitere Differenzierung des Spannungsbegriffes (in Verbindung mit dem Zeitbegriff) erforderlich. In diesen Fällen ist für zwei durch Bezeichnung festgelegte Punkte des Kreislaufes die Bedeutung des Wortes Spannung sonach unzweideutig.

99. Begriffe bei Wechsel-

Die einfache Bezeichnung „Spannung“ verliert aber ihre Eindeutigkeit und zwecks Ausschliessung von Zweifel und Irrtum wird eine nähere

Definierung zur Kennzeichnung des jeweilig gemeinten Unterbegriffes unbedingt notwendig, sobald die erregte Spannung in ihrem Wert rasch veränderlich ist. Die Verbindung des Spannungbegriffes mit dem Zeitbegriff erheischt eine Modifizierung oder Differenzierung der bisher zwischen zwei bestimmten Kreislaufpunkten einheitlichen Spannung und zwar sowohl bei quantitativer als qualitativer, d. h. auf das Vorzeichen bezüglicher Änderung. Will man auch die als Wellenstrom bezeichneten elektrischen Ausgleicherscheinungen mit einschliessen, so wäre diese Begriffsbildung nicht nur für eine rasche Änderung der primären Spannungserregung, sondern auch für rasch veränderliche Widerstandsverhältnisse im Stromkreis zu benutzen. Allgemein käme hierbei also die rasche (zeitliche) Spannungsänderung zwischen irgend zwei örtlich feststehenden Stromkreispunkten in Frage.

spannung.

Die begriffliche Teilung wird namentlich erforderlich beim technischen (symmetrischen) Wechselstrom, welcher durch rasche periodische Spannungsänderungen gekennzeichnet ist, die zu dem Nullwert symmetrisch verlaufen und quantitativer und qualitativer Natur sind, ferner beim Wellenstrom mit einer nur quantitativen, oder überhaupt unsymmetrisch periodischen Spannungsänderung und endlich bei einer aperiodischen Spannungsänderung von hinreichender Raschheit. Letztere ist gewöhnlich auf die Angaben von Instrumenten, das ist die Schwingungsdauer ihrer bewegten, mit mechanischer Trägheit begabten Massen zu beziehen. Um in allen diesen Fällen mit dem Spannungsbegriff operieren zu können, ist seine Differenzierung erforderlich in Momentanspannung, Integralspannung und hieraus abgeleitet die Mittelwerte der Spannung, welche für praktische, namentlich technische Zwecke wichtig sind. Unter Momentanspannung *e* würde hierbei der einseitige Spannungswert zu verstehen sein, der in einem bestimmten Zeitmoment zwischen den betrachteten Kreislaufpunkten oder auch als EMK im Stromkreis vorhanden ist; der Zeitmoment wird bezogen entweder auf die Periode bei periodisch mit der Zeit veränderlichen Spannungswerten, oder bei aperiodischen auf einen Anfangswert der einmaligen Änderung. Da für praktische Zwecke der Moment ohne jede Zeitdauer in seiner abstrakten Forderung nicht erhältlich ist, so wird der praktische Momentanwert (z. B. bei Messungen mit einem Kontaktmacher) auch strenggenommen einen Mittelwert darstellen, doch ist der letztere solange für einwandsfrei anzusehen, als die Zeitdauer des Momentes einen hinreichend kleinen Bruchteil von der Perioden- oder allgemeinen Änderungszeit beträgt. Innerhalb derselben muss hierbei die Spannungsänderung gleichförmig erfolgen, d. h. sie darf bei graphischer Darstellung der Spannungskurve keine Richtungsänderungen einschliessen und ausserdem soll die absolute Änderung des Spannungswertes innerhalb der Messzeit nur einen untergeordneten Bruchteil des gemessenen Wertes ausmachen.

Bei der hier zu betrachtenden Spannungserregung durch magnetische Feldänderung innerhalb des Leiterkreises ist die Geschwindigkeit dieser Feldänderung $\left(\frac{dN}{dt}\right)$ mit dem absoluten Spannungswert proportional, also die Beschleunigung der Feldänderung $\left(\frac{d^2N}{dt^2}\right)$ mit der Spannungsänderung $\left(\frac{de}{dt}\right)$. Die letztere kann auch bezüglich des Zeitfaktors praktisch in sehr

weiten Grenzen variieren: bei Gleichstromdynamos mit praktisch angenähert konstanter Spannung ist die Feldbeschleunigung durch den Leiterkreis praktisch meist vernachlässigbar $\left(\frac{d^2 N}{d t^2} = \frac{d e}{d t} = 0\right)$; beim technischen Wechselstrom mit der Grössenordnung von 100 sekundlichen Feldwechseln ($z = 100$) ist $\left(\frac{d^2 N}{d t^2} = \frac{d e}{d t} = e' \omega\right)$ die Polargeschwindigkeit ω etwa 300 bis 600; bei den Teslaspannungen mit der Grössenordnung $z = 2000$ ist ω etwa 6000, während bei den HERTZschen Schwingungen die Schwingungszahlen (z) etwa die Grössenordnung 10^6 bis 10^9 haben. Hieraus folgt, dass eine Angabe des absoluten Wertes für den benutzbaren Zeitmoment dt in Sekunden natürlich nicht möglich ist, sondern nur jene relative Festsetzung der oberen Grenze, um bei graphischer Darstellung die beiden abstrakten Momentanwerte der Spannung e am Anfang und Ende von dt als Seiten eines Paralleltrapezes erscheinen zu lassen (vgl. Fig. 46), deren Mittelwert die gesuchte Momentanspannung e bildet. Letztere würde also die Höhe jenes zwischen Nullniveau und Spannungskurve eingeschlossenen Trapezes bilden und wäre durch

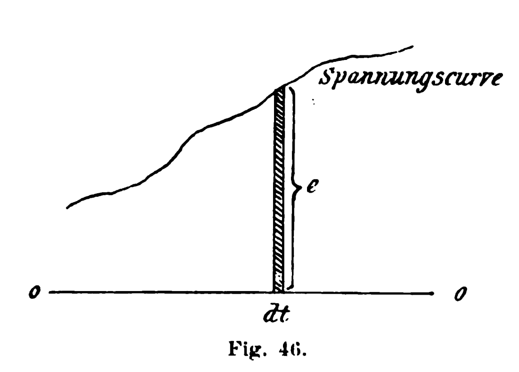


Fig. 46.

$$e = \frac{1}{dt}(e \cdot dt)$$

zu formulieren. Dementsprechend wäre jetzt die obige Formulierung der allgemeinen Gleichung für die Spannungserregung durch Feldänderung, wenn man N als Mass für die mit dem Leiterkreis verkettete Anzahl Kraftlinien oder das Leiterkreisfeld setzt

$$\text{Spannung } e = \pm \frac{dN}{dt} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (1)$$

Das Vorzeichen wird sich hierbei aus bestimmten konventionellen Festsetzungen ergeben: Behält man die gebräuchliche Richtung der Kraftlinien (vom Nordpol durch die Luft zum Südpol) bei, und bezeichnet man den Uhrzeigersinn als positiv, so hat man zu setzen

$$e = -\frac{dN}{dt}, \quad \ldots \ldots \ldots \quad (1a)$$

d. h. beim Sehen auf den Leiterkreis in Richtung des Feldes erzeugt eine Vergrösserung von N einen Spannungsantrieb im Nichtuhrzeigersinn, eine Verkleinerung von N einen Antrieb im Uhrzeigersinn (vgl. **70**).

Die schon oben als Klammerausdruck ($e \cdot dt$) auftretende Kombination von Spannung und Zeit als Produkt: Spannungszeit erscheint hier abermals in der Form

$$-dN = e \cdot dt. \quad \ldots \ldots \ldots \quad (1b)$$

Die Gleichung lässt erkennen, dass dieses Zeitintegral der Spannung $\int_0^t e \cdot dt$, welches in der obigen graphischen Darstellung als Fläche erscheint,

im vorliegenden Fall der Spannungserregung durch Feldänderung gleichbedeutend ist mit einer Anzahl Kraftlinien N, welche in die Verkettung mit dem Leiterkreis eintreten, bezw. aus einer solchen austreten. Eine derartige Kraftlinienänderung $N_1 - N_2$ ist also gleichwertig mit der Integralspannung $\int e \cdot dt$, ganz gleichgiltig, in wieviel Zeit dieselbe erfolgt; das Produkt aus Spannung und Zeit oder — bei Einführung eines Mittelwertes $E_N = (e)_m$ für e — der Ausdruck $E_N \,.\, (t_2 - t_1)$ muss sonach stets der Gleichung genügen

$$N_1 - N_2 = \int e\, dt = E_N \cdot (t_2 - t_1)$$

oder

$$E_N = \frac{N_1 - N_2}{t_2 - t_1} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (2)$$

Dies besagt, dass für eine bestimmte Änderung der verketteten Kraftlinienzahl $(N_1 - N_2)$ die mittlere Spannung E_N (Kraftlinien-Mittelwert) hoch ist bei kleinem Wert von $t_2 - t_1$, und niedrig bei grossem $(t_2 - t_1)$, d. h. langsamer Feldänderung.

Dieser Begriff der Integralspannung $\int e \cdot dt$ in Verbindung mit dem Integralstrom $\int i \cdot dt = \frac{1}{R} \int e \cdot dt$, der bei konstant bleibendem Widerstand R im Stromkreise jener direkt proportional ist, spielt für viele einseitige und aperiodische Spannungsstösse eine wichtige Rolle; er kann namentlich für hinreichend rasch verlaufende Spannungskurven zur direkten Ermittelung jener Kraftlinienänderung mittels Schwingungsgalvanometers dienen. Für alle Spannungswerte bezw. -kurven (vgl. hierzu auch **66**), welche nicht einseitig, d. h. auf derselben Seite des Nullniveau verlaufen, bleibt auch noch als wichtige Beziehung bestehen, dass die gesamte Änderung der mit dem Stromkreis verketteten Kraftlinien gleichwertig ist mit der Integralspannung oder in Gleichungsform

$$\int_{t_1}^{t_2} dN = \int_{t_1}^{t_2} e \cdot dt; \quad \ldots \ldots \ldots \quad (2a)$$

es ist jedoch darauf zu achten, dass die Kraftlinienänderung $\int_{t_1}^{t_2} dN$ zwischen den Zeitmomenten t_1 und t_2 nicht galvanometrisch ohne weiteres ermittelt werden kann, wie bei einseitigem Spannungsverlauf. Diese galvanometrische Ermittelung ist vielmehr nur im stande, die algebraische Summe der auf das Nullniveau bezogenen Integralspannung zu liefern, d. h. den Wert $F_1 - F_2$ der beiden Spannungsflächen $\int e \cdot dt$ zu beiden Seiten des Nullniveau (vgl. Fig. 47). Die gesamte Änderung von N bezw. $\int e \cdot dt$ unabhängig vom Vorzeichen ist aber durch $F_1 + F_2$ dargestellt, so dass ihre Ermittelung nur durch künstliche Kommutierung von F_2 bei Benutzung galvanometrischer oder voltametrischer Messinstrumente möglich wäre.

100. Veränderliche Spannungen und ihre Mittelwerte.

Neben den Werten der Momentanspannungen und der Integralspannung, deren begriffliche Unterscheidung und Festlegung zwar unerlässlich ist, die jedoch für direkte praktische Verwertung in den meisten Fällen ungeeignet sind, bedarf man sonach noch der Einführung eines praktisch verwendbaren Mittelwertes bezw. mehrerer solcher, je nach der Spannungswirkung, welche gerade ins Auge gefasst ist. Bei diesen Mittelwerten hat man sonach wiederum genau zu unterscheiden, wie die Bildung des Mittels stattgefunden hat.

Was zunächst das Verhältnis der Integralspannung $\int e \cdot dt$ einerseits zu den eigentlichen Spannungen, wie Momentanspannung oder irgend einem Mittelwert der Spannung anlangt, so ist ohne weiteres klar, dass sich jene durch die Zeitdimension von den letzteren unterscheidet und sich in analoger Weise zu ihnen verhält, wie der Begriff Energie oder Arbeit A, die unabhängig von der Zeit beliebig rasch oder langsam zur Umsetzung gelangt, zu dem Begriff Leistung (Effekt) W, das ist der auf die Zeiteinheit bezogenen Intensität der Umsetzung, z. B. in Watt, so dass die Gleichung besteht

$$d\,W = \frac{d\,A}{d\,t},$$

oder unter Einführung eines Mittelwertes für W in der Zeiteinheit

$$A = W \cdot (t_1 - t_2) \quad \text{oder} \quad W = \frac{A}{(t_1 - t_2)}.$$

Die Intensität der Spannung E wird im Gegensatz zur Integralspannung (Spannung $\times$ Zeit) gewöhnlich kurzweg als Spannung be-

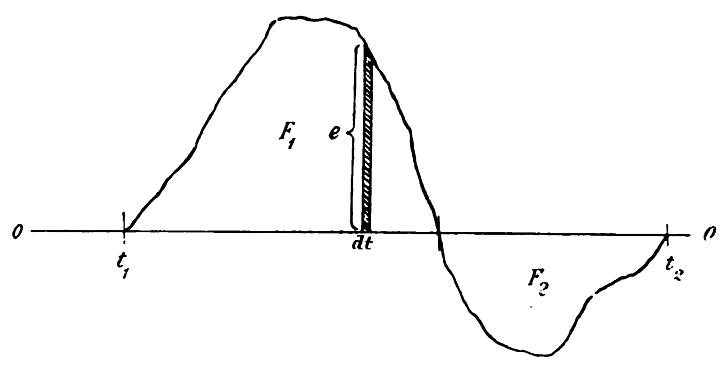


Fig. 47.

zeichnet. Sie lässt bei zeitlicher Variabilität natürlich ebenso wie die Leistung W für die meisten Zwecke auch die Ersetzung durch eine mittlere Intensität $(e)_m = E$ zu, doch muss bei der Möglichkeit der Bildung verschiedener Mittelwerte zwischen diesen unterschieden werden. Oben waren bereits zwei Mittelwerte für die Spannungsintensität angeführt:

1) der algebraische, d. h. mit Rücksicht auf das Nullniveau genommene Mittelwert $\bar{E}$, wie er durch galvanometrische und voltametrische Messinstrumente angezeigt wird,

2) der einfache oder Kraftlinien-Mittelwert E_N, welcher ein direktes Mass für die mittlere Kraftlinienänderung im Stromkreis während der der Betrachtung unterworfenen Zeit bildet. Bei graphischer Darstellung der Momentanspannungen als Ordinaten zu den fortschreitenden Zeitmomenten als Abscissen (vgl. Fig. 47) ergiebt sich E_N unabhängig vom Vorzeichen der Werte e (bezogen auf das Nullniveau) durch die Summen aller Flächen $F_1 + F_2 + \cdot \cdot$ dividiert durch die zugehörige Zeitabscisse, so dass die Gleichung lautet

$$E_N = \frac{F_1 + F_2 + \cdots}{t_m - t_0} = \frac{N}{t}, \quad \ldots \ldots \quad (2\text{b})$$

d. h. E_N = mittlere Kraftlinienänderung im Leiterkreis pro Zeiteinheit.

Der so gebildete und auf die Sekunde bezogene Wert liefert die Grundlage für die so wichtige Kraftliniengleichung (12 in **103**), welche den Ausgangspunkt fast aller Berechnungen der Elektrotechnik bildet.

Neben diesen beiden Mittelwerten ist als der praktisch weitaus wichtigste

3) der sogenannte effektive Mittelwert E zu nennen, der seine Bezeichnung dem Umstande verdankt, dass er für alle Beziehungen in Frage kommt, welche die elektrische Leistung angehen, und gleichzeitig durch die praktisch wichtigsten Messinstrumente direkt zur Anzeige gelangt; wegen seiner häufigen Benutzung ist er hier ohne Index eingeführt.

Für die Strombildung nach dem Ohmschen Gesetz $\left(J = \frac{E}{R}\right)$ kommt, wie oben erwähnt, für veränderliche EMKK oder Spannungen die Gleichung $\int i\,dt = \frac{1}{R}\int e \cdot dt$ in Frage. Bei Benutzung der Mittelwerte unter 1 und 2, d. h. Division der Integralwerte durch die Zeit folgt

$$\overline{J} = \frac{\overline{E}}{R} \text{ bezw.}$$

$$J_Q = \frac{E_N}{R}, \quad \ldots \ldots \ldots \ldots (3)$$

wenn J_Q den Elektrizitätsmenge-Mittelwert der Stromstärke bezeichnet.

Bei der ersten Potenz der Spannung ergiebt sich somit einer der beiden obigen Mittelwerte, je nachdem man galvanometrisch-algebraisch misst oder die Kraftlinienänderung ins Auge fasst, welche vom Vorzeichen bezw. Nullniveau unabhängig ist (vgl. **67**).

Für die elektrische Leistung in einem bestimmten Moment, d. h. die Umwandlung elektrischer Energie in eine andere Energieform kommt aber nicht die erste Potenz der momentanen Spannung e in Frage, sondern nach der Gleichung für die Momentanleistung w

$$w = \frac{e^2}{R}$$

das Quadrat der Spannung. Der über eine bestimmte Zeit genommene Mittelwert aller Quadrate der Momentanspannungen, das ist $\frac{1}{t}\int_0^t e^2 \cdot dt$ wird daher den dritten für die Leistung wichtigen Mittelwert

$$E = \sqrt{\frac{1}{t}\int_0^t e^2 \cdot dt} \quad \ldots \ldots \ldots (4)$$

liefern. Dieser Wert wird von allen quadratisch wirkenden Messinstrumenten geliefert (Dynamometer, Hitzdrahtinstrumente und Elektrometer), deren Wirkungsweise auf der Summierung aller Antriebe beruht, die mit e^2 proportional sind.

Die Betrachtungen sind allgemein, d. h. für beliebigen Spannungsverlauf giltig. Für spezielle Fälle, wie für den technischen Wechselstrom mit periodischem und gegen das Nullniveau symmetrischem Verlauf der Spannungskurve werden noch eine Anzahl weiterer Beziehungen gelten, welche aber eine hierauf beschränkte Giltigkeit besitzen. So ist z. B. für die technische

(symmetrische) Wechselspannung der erste Mittelwert $\bar{E} = 0$, d. h. kein einseitiges Gleichstromniveau vorhanden. Der Kraftlinien-Mittelwert und der effektive Mittelwert ($\tilde{E}_N$ und $\tilde{E}$) werden in einem bestimmten durch die Form der Spannungswelle bedingten Zahlenverhältnis f stehen, wofür die Bezeichnung „Formfaktor“ üblich ist, so dass

$$\frac{\tilde{E}}{\tilde{E}_N} = \frac{\sqrt{\frac{1}{t}\int_0^t e^2 \cdot dt}}{\int_0^t e\, dt} = f \text{ oder } \tilde{E} = f \cdot \tilde{E}_N. \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

Hieraus geht hervor, dass $\tilde{E}_N$, welches nur vom Flächeninhalt der Spannungskurve, oder was dasselbe sagt, von der absoluten Kraftlinienänderung pro Zeiteinheit abhängt, als Grundlage dient, während der von der Art dieser Änderung (der Beschleunigungsverteilung) mitbedingte effektive Mittelwert $\tilde{E}$ durch den Zusatz des Formfaktors bedingt wird. $\tilde{E}$ besitzt also eine unendliche Mannigfaltigkeit mehr als $\tilde{E}_N$. Für den speziellsten oder konkretesten Fall der symmetrischen Wechselspannung mit bestimmtem Kurvenverlauf wird ferner dieses Verhältnis f durch eine bestimmte Zahl festgelegt sein und ebenso ausserdem für den abstrakten Fall einfacher und regelmässiger geometrischer Kurven das Verhältnis des Maximalwertes der Momentanspannungen (e') zu den Mittelwerten $\tilde{E}_N$ und $\tilde{E}$. Dieses Verhältnis sowie der Formfaktor f (vgl. Fleming, ETZ 1896, 132) ist z. B. für einige ausgezeichnete Kurvenformen in nebenstehender Tabelle zusammengestellt.

Für Wechselstrom mit genau rechteckigem Kurvenverlauf wäre also, gerade wie bei Gleichstrom $\tilde{E}_N = \tilde{E}$. Der Quotient beider $(\tilde{E} : \tilde{E}_N)$ in Gestalt des Formfaktors f wird um so grösser, je grösser die Abweichung vom Rechteck, d. h. je stärker zugespitzt der Teil der maximalen Werte gegenüber der Zeitbasis ist. Der letzte Wert (1·44) von f wird daher schon sehr nahe seinem überhaupt erreichbaren Maximum liegen. Erhebliche Steigerung dieses Wertes ist allerdings noch möglich bei intermittierendem Kurvenverlauf, d. h. Vorhandensein des Spannungswertes Null während eines grösseren Teiles jeder Periode. In Hinblick auf die elektrotechnische Praxis, besonders auf die Eisenverluste und dielektrischen Beanspruchungen ist neuerdings (vgl. Benischke, ETZ 1900, 674) die Benutzung des Verhältnisses

$$\frac{e'}{\tilde{E}} = \frac{\text{Scheitelwert}}{\text{Effektivwert}} = \sigma$$

als „Scheitelfaktor“ in Vorschlag gebracht worden.

101. *Kraftliniengleichung und ihre Umformung bei Wechselspannung.*

Nach diesem kurzen Hinweis auf die immer weitergehende Spezialisierung bis zum konkreten Einzelfall am Beispiel der Wechselspannung sei wieder auf die obige allgemeine Fassung des Gesetzes für die Spannungserregung durch Feldänderung zurückgegangen. Kurzweg pflegt man es wohl meist als Induktionsgesetz zu bezeichnen, obwohl die Bezeichnung „Induktion“ mit ihrer Vieldeutigkeit, d. h. ihrer Benutzung auf allen Gebieten der Elektrizität und des Magnetismus den weniger Kundigen leicht die klare Auffassung erschwert und deshalb auch hier vorläufig vermieden wurde.

Die Beziehung zwischen den Momentanspannungen e und den übrigen Spannungswerten und -begriffen ist im Vorausgegangenen klar gelegt worden, es genügt nunmehr sich auf den oben formulierten allgemeinsten Fall

$$e = -\frac{dN}{dt}$$

zu beschränken, doch muss um Zweideutigkeiten zu vermeiden noch die Bezeichnung „Kraftlinienänderung im Leiterkreis“ näher beleuchtet werden.

Kurvenform der elektromotorischen Kraft	Darstellung	Formfaktor f
Rechteck		1,00
Halbellipse		1,04
Halbkreis		1,04
Halbellipse		1,04
Sinuslinie		1,11
Dreieck		1,15
Umgekehrte Viertelsinuslinien		1,31
Umgekehrte Viertelkreise oder Viertelellipsen . .		1,44

Für die Spannungserregung, oder auch den Spannungsantrieb $\int e \cdot dt$ im Sinne des mechanischen von der Kraft P während des Zeitteilchens dt ausgeübten „Antriebes“ Pdt, kommen nur die mit dem Stromkreis verketteten Kraftlinien in Betracht. Diese müssen nach der Vorstellung von MAXWELL (vgl. **69** und **70**) während der Bildung oder Auflösung der magnetischen Wirbelfäden den Leiterkreis als elektromagnetische Welle durchsetzen und gerade während dieses Durchsetzens jenen Antrieb ausüben. Die Kraftlinienzahl N soll als Ausdruck für die gesamte zur Wirkung gelangende, d. h. den Antrieb $\int e \cdot dt$ bedingende Wirbelintensität dienen und muss daher für die Spannungserregung mit Rücksicht auf den Leiterkreis formuliert werden. Unter vorläufiger Zurückstellung der Bedeutung Leiterkreis in den scheinbar zweifelhaften Fällen von ungeschlossenen „induzierten“ Leiterstrecken wird für geschlossene Leiterkreise bei einfachem, ungekreuztem Verlauf der Leiterbahn eine Zweideutigkeit hinsichtlich des Wertes von N

nicht bestehen können; die in irgend einem Moment mit dem betrachteten Leiterkreis verkettete Anzahl Kraftlinien wird erhalten, wenn man alle den Leiterkreis kettengliedartig umlaufenden Kraftlinien zählt und zwar nur einfach zählt. Bezeichnet man dieses einfache Feld mit N_1, so ist für diesen Fall $N = N_1$. Der Kreislauf wird aber sehr oft nicht einfach sein, d. h. es wird keine Schliessung der Leiterbahn nach einmaliger Umlaufung des inneren Leiterfeldes stattfinden, sondern zwei- oder mehrmalige Umschlingung bestimmter Stücke des Leiterfeldes von seiten des Leiterkreises nach Art von Wicklungen oder spiralförmig geführten Bahnen. In Übereinstimmung mit den Thatsachen, sowie der den letzteren angepassten Hülfsvorstellung ist alsdann für die Zahl N nicht die einfache Kraftlinienzahl oder das einfache umschlossene Feld N_1, sondern N_1 in Verbindung mit der Verkettungszahl (Windungszahl) w einzusetzen, für den Fall, dass alle Kraftlinien N_1 des einfachen Feldes mit allen Windungen w verkettet waren. Dies ist zwar annäherungsweise erreichbar, weshalb eine praktische Abstraktion nach diesem Grenzwert in einzelnen Fällen zulässig wird, jedoch kann es nie streng richtig sein. Aus diesem Grunde wird strenggenommen in allen Fällen, praktisch zwar auch sehr häufig aber nicht immer, eine Korrektion erforderlich. Gewöhnlich pflegt man diese Korrektion vom praktischen Standpunkt aus als „Streuung" (S) zu bezeichnen, welche von dem (abstrakten) Grenzwert der totalen Kraftlinien

$$N_t = N_1 \cdot w \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

abzuziehen wäre, um den richtigen, für die obige Spannungsgleichung in Betracht kommenden Wert zu erhalten. Als Spannung bezw. Streufeld erscheinen also dem Techniker mit Hinblick auf ein wirtschaftliches Ziel — das ist möglichste Ausnutzung der zur Entstehung gebrachten Kraftlinien — alle an jenem oberen Grenzwert fehlenden Kraftlinienwindungen. Dieses Fehlprodukt bildet sonach eine einwandfreie Definition der vielfach nicht hinreichend bestimmt erkannten und definierten Bezeichnung „Streuung", die nur mit Rücksicht auf ein ganz bestimmtes praktisches Ziel einen Sinn giebt. Bezeichnet man bei Vorhandensein einer „Wicklung" im Leiterkreis und bei Verwendung ihrer Windungszahl w in der Kraftliniengleichung dieses Fehlprodukt mit S, so wäre allgemein zu setzen als wirksame Kraftlinienzahl

$$N = N_1 \cdot w - S. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7)$$

Hieraus folgt für das einfache reduzierte mittlere Streufeld der Wert $\frac{S}{w}$.

Wird dem mit der Wicklung verketteten Kraftlinienzug ein völlig geschlossener Eisenweg von hinreichendem Querschnitt und (falls nötig) genügender Unterteilung geboten, so liegt das Feld fast allein im Eisen und S kann gegenüber $N_1 \cdot w$ vernachlässigbar klein sein. In den weitaus meisten Fällen verdient diese Korrektion aber die grösste Beachtung der berechnenden Elektrotechnik und bereitet sowohl theoretisch als praktisch mit die grössten Schwierigkeiten. Anschliessend sei hier sogleich erwähnt, dass bei den in der Technik ja überwiegend eisenhaltigen Konstruktionen zur Erregung oder Umsetzung von Spannung eine weitergehende Auflösung von N_1 mit Rücksicht auf die magnetische Materialbeanspruchung vorgenommen zu werden pflegt, indem man die einfache Kraftlinienzahl (Nutzfeld) N_1 in $B \cdot q$

zerlegt, wenn B die bezüglich des Feldquerschnittes q mittlere spezifische magnetische Induktion bezeichnet. Handelt es sich, wie in der Wechselstromtechnik, um periodisch-symmetrische (vgl. **66**) Spannungsänderung und damit in Zusammenhang auch Feldänderung (N_1), so ist die Feldänderung innerhalb der Zeit eines Wechsels (Ansteigen von Null auf Maximum und wieder Abnehmen von Maximum auf Null) durch $2 N_1' = 2 \cdot B' \cdot q$ gegeben, wenn N'_1 die während der Halbperiode (Wechsel) vorhandene Maximalzahl der (einfachen) Kraftlinien des Feldes bezw. B' die im gleichen Moment vorhandene spezifisch magnetische Maximalinduktion (Kraftlinien auf die Querschnittseinheit, gewöhnlich cm²) angiebt. Für eine Periode oder zwei Wechsel wäre sonach die Änderung doppelt so gross.

Die Gleichung für die Kraftlinienänderung im betrachteten Leiterkreis innerhalb einer Periode lautet sonach

$$\int_0^{2\pi} dN = 4\,(N'_1 \cdot w - S) = 4\,(B' \cdot q \cdot w - S). \quad . \quad . \quad (8)$$

Die Einführung der gebräuchlichen Zeiteinheit (Sekunde) durch Multiplikation mit der Periodenzahl $\sim$ pro Sekunde oder Wechselzahl $\frac{z}{2} = \sim$ ergiebt die Kraftliniengleichung, welche den Ausgangspunkt sehr vieler Berechnungen der Elektrotechnik, namentlich der Wechselstromtechnik, bildet:

$$\int_t^{t+1} dN = 2\,z \cdot (B' \cdot q \cdot w - S), \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8a)$$

wenn die Zeit t in Sekunden gemessen wird.

Bei vorläufiger Abstraktion von der Streuung S und Beschränkung auf den Eisenquerschnitt q ist für die Zeit τ eines Wechsels

$$\frac{N}{\tau} = 2\,z \cdot B' \cdot q \cdot w.$$

Da nun nach dem Früheren (Gleichung 2b in **100**) diese mittlere Kraftlinienänderung im Leiterkreis $\left(\frac{N}{t}\right)$ pro Zeiteinheit (τ) gleich dem einfachen Mittelwert der Spannung $(\tilde{E}_N)$ ist, so folgt

$$\tilde{E}_N = 2\,z \cdot B' \cdot q \cdot w, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8b)$$

wenn beide in gleichen Einheiten, z. B. CGS-Einheiten oder Kraftlinien pro Sekunde gemessen werden. Für den Übergang zum technischen Mass ist zu beachten, dass die mittlere Spannung von 1 Volt (nicht quadratisch-effektiv, sondern einfach gemessen) der sekundlichen Kraftlinienänderung im Leiterkreis von 10^{-8} Kraftlinien entspricht. Sonach

$$\tilde{E}_N \text{ in Volt} = 2 \cdot z \cdot B' \cdot q \cdot w \cdot 10^{-8}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8c)$$

oder für die in der Wechselstromtechnik gebräuchliche Angabe in effektivem Mass, da $\tilde{E} = f \cdot \tilde{E}_N$ (vgl. oben)

$$\tilde{E} \text{ in Volt} = 2 \cdot f \cdot z \cdot B' \cdot q \cdot w \cdot 10^{-8} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (9)$$

$$= 4 \cdot f \cdot \sim \cdot B' \cdot q \cdot w \cdot 10^{-8}.$$

102. Offene Leiterkreise. Integrale und differentielle Betrachtungsweise.

Nachdem die Art der Kraftlinienzählung beim allgemeinen Gesetz der Spannungserregung klargestellt ist, bedarf der Begriff des Leiterkreises noch einiger Hinweise, da bis jetzt nur in sich geschlossene Stromkreise der Betrachtung unterworfen waren. Für geöffnete Stromkreise, sei die Unterbrechung auch noch so kurz, scheint eine Unbestimmtheit vorhanden, insofern diese Lücke eine eigentliche Verkettung zu verhindern und die Abgrenzung des „Feldes“, d. h. die zur Anwendung jenes Gesetzes erforderliche Schliessung und Querschnittsbildung des inneren Leiterfeldes ganz willkürlich zu machen scheint. Diese Unbestimmtheit verliert sich aber, wenn man als Schlusslinie die Verschiebungsbahn im trennenden Dielektrikum ansieht. Bei fehlender Spannung an den Enden des ungeschlossenen Leiters ist dieselbe zwar nicht wirklich, aber doch virtuell vorhanden und bei Kenntnis der dielektrischen Widerstandsverhältnisse bestimmbar und stellt sich sofort bei Auftreten von Spannung her. Bei der Teilnahme grösserer Querschnitte des trennenden Dielektrikums ist offenbar die Schwerlinie der Verschiebung bestimmend. Der einzige Fall, welcher durch diese Festlegung noch eine Unbestimmtheit behält, ist die Bewegung eines völlig geraden Leiterstückes durch ein magnetisches Kraftlinienfeld, welches dielektrisch nach allen Seiten symmetrisch gedacht ist. In diesem Falle wären auch die dielektrischen Verschiebungsbahnen von einen Ende des Leiters zum andern bei Auftreten von Spannung in demselben symmetrisch, und es müsste daraus geschlossen werden, dass in einem solchen Leiter keine Spannung erregt wird, da der Begriff Eintritt oder Austritt in den Leiterkreis (Vermehrung oder Verminderung der Kraftlinien im Leiterkreis) unbestimmt wird bezw. auf den resultierenden Wert Null führt (von Wirbelströmen natürlich abgesehen). Thatsächlich ist dies auch sehr wohl möglich, denn eine solche Spannungserregung ist nicht gut festzustellen, da jede Verbindung mit Messleitungen eben diesen Spezialfall in einen Leiter*kreis* (mit einseitiger Krümmung) umwandelt, bei dem die Schlusslinie durch die Verschiebungsbahn eindeutig festgelegt ist und die thatsächliche Spannungserregung in Übereinstimmung mit dem obigem allgemeinen Gesetz der Spannungserregung erfolgt. Dieser Fall hat sonach gar kein praktisches, sondern nur ein gewisses theoretisches Interesse, insoweit er die theoretische Betrachtung der Spannungserregung in einem geraden Leiter ohne gedankliche Verbindung mit einem den Schluss bewirkenden Leiterkreis betrifft. Obwohl beide Betrachtungen über die Spannungserregung, d. h. diejenige, welche vom differentiellen geraden Leiterstück ausgeht und aus der von ihm geschnittenen Kraftlinienzahl die erregte Spannung (EMK) formuliert, und diejenige, welche die integrale, d. h. auf einen stets geschlossen gedachten Leiterkreis bezogene Kraftlinien*änderung* in demselben ins Auge fasst, *praktisch* stets zu demselben Endresultat gelangen werden, so scheint die integrale Betrachtungsweise zunächst klarer. Das differentielle Verfahren, das für die Rechnung oft bequemer und vorteilhafter sein wird, ist nur unter der ausdrücklichen oder stillschweigenden Voraussetzung einwandfrei, dass jenes Schneiden von Kraftlinien eine Feldänderung in einer Leiterbahn hervorbringt, die entweder leitend geschlossen oder mit eindeutigem dielektrischen Schlussstück, wie oben angegeben, versehen ist. Praktisch werden allerdings nie andere Fälle vorkommen.

103. Einteilung der Induk-

Nach diesen Betrachtungen über die *allgemeinste* Formulierung des Gesetzes der Spannungserregung durch Feld*änderung* im Leiterkreis sollen

tionsvorgänge. Bewegungsinduktion.

seine Spezialisierungen, wie sie sich aus der Verschiedenheit der Art dieser Änderung ergeben bezw. durch den Gebrauch als praktisch wünschenswert erwiesen haben, ins Auge gefasst werden. Treffen wir für das Folgende des vorliegenden Abschnittes in Übereinstimmung mit einem weitverbreiteten Gebrauch die Festsetzung, dass die Bezeichnung „Induktion" kurzweg für „Erregung des elektrischen Spannungszustandes durch Feldänderung innerhalb des Leiterkreises" benutzt werden soll, so würden die drei etwa als koordiniert anzusehenden Teilgebiete des Ganzen durch die Bezeichnungen: Bewegungsinduktion, Wechselinduktion und Selbstinduktion charakterisiert werden können.

Unter Bewegungsinduktion würden alle gewöhnlich als „Induktion" kurzweg[1]) bezeichneten Fälle zu begreifen sein, in welchen jene Spannungserregung durch relative mechanische Bewegung des induzierten Leiters gegenüber dem induzierenden Feld erfolgt. Hierbei ist das Feld während des Betrachtungsmomentes als stationär bezüglich seiner auf die Feldachse bezogenen Kraftlinienanordnung anzusehen oder, falls das letztere nicht der Fall, die Intensitätsänderung des Feldes als herbeigeführt durch mechanische Bewegung eines Teiles des magnetischen Kreislaufes, z. B. eines eisernen Schlussstückes.

Unter Wechselinduktion wären alle Fälle zu begreifen, in welchen — nach Art der Verhältnisse am Wechselstromtransformator — eine mechanische Bewegung des induzierten Leiters oder des induzierenden Feldes, auch von Teilen des Feldträgers nicht stattfindet, vielmehr die Feldänderung in ersterem durch Änderung des Stromes in einer zweiten gleichfalls ruhenden Leitung erfolgt, welche das Feld hervorruft.

Unter Selbstinduktion wären endlich alle Fälle zu begreifen, in welchen die Spannung induzierende Wirkung der mit Feldänderung verknüpften Stromänderung auf den eigenen erregenden Stromkreis in Frage kommt. Im letzteren Falle sind also die beiden, bei der Wechselinduktion auf zwei verschiedene Stromkreise getrennten Funktionen in demselben Leiterkreis vereinigt: nämlich die Funktion das veränderliche Feld zu erregen (induzieren) einerseits und die Funktion durch das gemeinschaftliche veränderte Feld in den elektrischen Spannungszustand versetzt (induziert) zu werden andererseits.

Stellen wir die Bewegungsinduktion in der Betrachtung voran und lassen die Unterscheidung in Induktion bei feststehendem Feld und bewegtem Leiter und bei feststehendem Leiter und bewegtem Feld bei Seite, weil dieselbe zwar für die praktischen Konstruktionen wichtig und daher daselbst näher zu behandeln (vgl. Bd. III und IV), hier aber nebensächlich ist, da für die vorliegende Betrachtung nur die relative Bewegung in Frage kommt. In gleicher Weise ist fürs Erste die Art der Felderzeugung gleichgiltig, also ob dasselbe durch permanente oder Elektromagnete, ob in letzterem Fall

1) Da Wechselinduktion und Selbstinduktion bereits durch eine Beifügung zu „Induktion" unterschieden sind, so ist allerdings praktisch das einfache Wort für alle Restfälle verwendbar geworden; logisch wäre aber eine Beifügung erwünscht, doch ist leider gerade der Gebrauch der Bezeichnung „Induktion" durch die Entwickelung der Elektrophysik sehr ungünstig beeinflusst worden, da vom wissenschaftlichen (gedankenökonomischen) Standpunkt die Vieldeutigkeit bezw. Unbestimmtheit einer Bezeichnung stets unbefriedigend und verbesserungsbedürftig erscheinen muss, ganz abgesehen davon, dass im vorliegenden Fall die Wahl des Wortes für unsere gegenwärtige Auffassung zu wenig charakteristisch erscheint.

unter Verwendung magnetischer Materialien oder ohne solche gegeben ist. Denken wir uns das Feld durch Richtung und Dichte von magnetischen Kraftlinien (richtiger Induktionslinien, vgl. **180** in H. I, 2) charakterisiert, so wird die Bewegung von Teilen eines Leiterkreises in dem so charakterisierten Feld im allgemeinen mit einer Kraftlinien**änderung** im Leiterkreis, d. h. Spannungserregung verbunden sein. Die spezielle Formulierung des allgemeinen Induktionsgesetzes (vgl. **102**) bezw. der Kraftlinien**änderung** im Leiterkreis wird für diese Fälle am bequemsten durch die in einer Zeiteinheit von den einzelnen Leiterelementen **geschnittenen** Kraftlinien, das ist ihrer mit der Bewegung notwendig verbundenen gegenseitigen Durchsetzung erfolgen. Sowohl die Formulierung der von den einzelnen Leiter**elementen** in der Zeiteinheit (dt, Sekunde, Umdrehung) geschnittenen Kraftlinienzahl als auch diejenige der resultierenden Kraftlinienänderung, das ist die algebraische Summierung der Einzeltriebe (unter Berücksichtigung des Vorzeichens) ist nunmehr eine rein analytisch-geometrische Aufgabe ohne weitere Hinzuziehung neuer physikalischer Momente, welche sich allein auf das Hauptgesetz beschränken. Dies gilt natürlich ebenso für den ganzen Leiterkreis wie für einen bestimmten endlichen Teil desselben, z. B. den Teil, welcher den Sitz der EMK umfasst, vorausgesetzt, dass das Feld gegeben ist. Für die Erzeugung und Gestaltung des Feldes sind die später zu behandelnden Betrachtungen (vgl. H. I, 2) massgebend.

Auf Grund jener geometrischen Überlegungen ergiebt sich z. B. sofort, dass ein Leiterelement dl bei geradliniger, drehungsfreier Bewegung mit der gleichförmigen Geschwindigkeit v in einem **homogenen** magnetischen Feld mit der Kraftliniendichte B in der Zeiteinheit

$$dl \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta$$

Kraftlinien schneidet, falls die Lage des Leiterelements und Kraftlinienrichtung den Winkel α miteinander einschliessen, während β den Winkel zwischen Kraftlinienrichtung und Bewegungsrichtung des Leiterelementes angiebt. Die Kraftlinienänderung in dem zum Leiterelement gehörigen Leiterkreis, oder — was auf Grund der früheren Gleichung dasselbe sagt — der vom Leiterelement gelieferte Spannungs**beitrag** de ergiebt sich sonach zu

$$de = dl \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (10)$$

da, wie schon erwähnt, das Material des Leiterelementes ohne Einfluss, somit die sonst noch als Faktor auf der rechten Seite erforderliche Materialkonstante des Leiters in Wegfall kommen kann. Bei ungleichförmiger Geschwindigkeit würde anstelle von v allgemein $\frac{ds}{dt}$ zu treten haben, doch stets würde $dl \cdot \frac{ds}{dt} \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta$ einen Ausdruck für die Projektion der überstrichenen Fläche auf die Ebene senkrecht zu den Kraftlinien liefern. Die Integration der Gleichung über eine endliche Leiterlänge l würde alsdann für ein Zeitelement der Bewegung den Wert der Momentanspannung e zu

$$e = \int_0^l de = \int_0^l dl \cdot \frac{ds}{dt} \cdot dt \cdot B \cdot \sin \alpha \sin \beta = l\,(ds \cdot B \sin \alpha \sin \beta) \quad (10a)$$

und weiterhin für die Zeiteinheit den Wert der einfach gemessenen Mittelspannung (Kraftlinien-Mittelwert) E_N zu

$$E_N = l \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (11)$$

ergeben, wenn v die mittlere Geschwindigkeit. Werden alle Grössen in CGS-Einheiten gemessen, d. h. B in Kraftlinien auf den cm^2, die Leiterlänge l in cm und die Leitergeschwindigkeit v in cm auf die Sekunde eingesetzt, so folgt E_N gleichfalls in CGS-Einheiten oder 10^{-8} Volt, so dass die Gleichung für den effektiv gemessenen Mittelwert der Spannung folgt

$$E = (10^{-8} \cdot f \cdot l \cdot B \cdot v \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta) \text{ Volt.} \quad . \; . \; . \quad (12)$$

Hieraus können die Werte der Bewegungsinduktion für alle konkreten Fälle abgeleitet werden, welche sich in den Beträgen der einzelnen Faktoren, sowie namentlich in dem Ergebnis der von den Wicklungsdimensionen abhängigen Integrationswerte für $\int dl \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta$ voneinander unterscheiden werden; bezüglich dieser möge jedoch auf Bd. III und IV verwiesen sein.

Erwähnenswert bleibt noch, dass für die Ableitung der in einem Leiterkreis erregten Spannung aus den differentiellen Antrieben, wie sie bei komplizierter Leiterkreisanordnung vom Leiterelement ausgehend meist unerlässlich sein wird, die oben erwähnte Regel über die Antriebs- oder Spannungsrichtung aus der Integralbetrachtung (vgl. **102**) nicht ausreicht, sondern dass eine weitere Merkregel für die induzierte Spannungsrichtung notwendig wird. Eine solche kann man sich entweder unter Heranziehung der früher behandelten mechanischen Hülfsvorstellungen (vgl. **70** und **99**) aus der Wirbelfadendrehrichtung unschwer selbst ableiten, oder man bedient sich einer der üblichen, rein gedächtnismässigen Regeln. Von den letzteren, welche nach Ansicht des Verfassers eine grössere Gefahr der Verwechslung in kritischen Fällen einschliessen als die Zuziehung von Hülfsvorstellungen, dürfte wohl die gegenwärtig beste, d. h. jenen Fehler im kleinsten Grade besitzende und auch verbreitetste die sogenannte Rechte-Hand-Regel oder auch drei Finger-Regel sein (vgl. Fig. 48). Hierbei ist zu merken, dass bei Bewegung des Leiters rechtwinklig zu den Kraftlinien (also $\sin \alpha$ und $\sin \beta = 1$) die drei kritischen Richtungen in folgendem Zusammenhang stehen: Hält man die rechte Hand in ungezwungener Haltung vor sich, sodass der von den übrigen Fingern abgebogene Daumen, der ausgestreckte Zeigefinger und der nach der Handfläche zu umgebogene Mittelfinger die drei Koordinatenrichtungen anzeigen, so repräsentiert die Daumenrichtung (vom Ballen zum Nagel) die Richtung der Bewegung v, welche der Leiter dem zugeführten mechanischen Druck bezw. der zugeführten mechanischen Leistung folgend ausführt, der Zeigefinger (vom Knöchel zum Nagel) die Feld- bezw. Kraftlinienrichtung und endlich der Mittelfinger (vom Knöchel zum Nagel) die Richtung der bei diesen Verhältnissen auftretenden elektrischen Spannung im Leiter, welcher gleichfalls in Mittelfingerrichtung sich erstreckt.

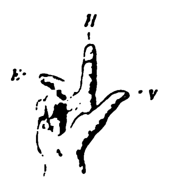


Fig. 48.

Besonderen Hinweis zur Vermeidung von Denkfehlern verdient vielleicht noch der Umstand, dass die Grösse der Kraftlinienänderung und nicht die Zahl der im Leiterkreis vorhandenen Kraftlinien bei veränderlicher

Spannung (EMK) ihre Momentanwerte bedingt, was namentlich zu beachten ist, wenn man einmal die differentiale Betrachtungsweise eines das Feld schneidenden Einzelleiters, ein zweites Mal die integrale, auf die ganze Spule bezügliche benutzt. Während beim Einzelleiter der Maximalwert der Spannung (e_{max}) im betrachteten Einzelleiterstück beim Vorübergang vor der Polmitte eintritt, wenn gleichförmige Geschwindigkeit angenommen wird und die Polmitte die grösste Kraftliniendichte besitzt, ist die Spannung einer Spule beim Vorübergang ihrer Mitte vor der Polmitte Null, weil in diesem Moment, in welchem die grösste Zahl Kraftlinien des Feldes mit den Spulenwindungen verkettet ist, die Kraftlinienänderung Null ist.

Neben den bisherigen Fällen der Bewegungsinduktion mit relativer Bewegung zwischen Leiter und Feld verdienen noch diejenigen Erwähnung, bei welchen nicht die Bewegung des ganzen an sich konstanten Feldes zur Feldänderung im Leiterkreis benutzt wird, sondern bei ruhendem Hauptteil des Feldträgers die durch Bewegung des Schlussstückes im magnetischen Kreislauf erzielte Intensitätsschwankung des Kraftlinienfeldes, also eine Änderung des magnetischen Kreislaufwiderstandes bei konstantem Erregerstrom. Diese bereits zur Wechselinduktion hinüberleitenden Fälle bieten nicht nur für die Schwachstromtechnik (Telephon), sondern auch für die Starkstromtechnik Interesse, da die sogenannten Induktortypen unter den Wechselstromdynamos diese Abart der Bewegungsinduktion in Gestalt der periodischen Änderung des magnetischen Kreislaufwiderstandes bei ruhender induzierter und Elektromagnetwicklung benutzen.

Da der Zusammenhang der Spannung in ihren verschiedenen Wertemodifikationen mit den zugehörigen Werten der Feldänderung im Leiterkreis sich aber völlig übereinstimmend, teils mit dem vorausgegangenen, teils mit den bei der Wechselinduktion folgenden Betrachtungen darstellt, so sei bezüglich der übrigen hierfür wichtigen Sonderfälle zum Teil auf die Ausführungen beim magnetischen Ausgleichgesetz, besonders aber auf Bd. IV (Wechselstromdynamos) verwiesen.

104. Wechselinduktion, Streuung und Definition der Koeffizienten.

Unter Bewegungsinduktion wurden alle Fälle begriffen, in denen die relative mechanische Bewegung eines Leiterkreises (oder eines Teiles von ihm) und eines an sich konstanten Kraftlinienfeldes, oder bei Variabilität des letzteren die mechanische Bewegung von Teilen des magnetischen Kreislaufes, die zu Spannungserregung notwendige Feldänderung innerhalb des Leiterkreises bewirkt. Von diesen pflegt man die Spannungserregung bezw. Übertragung zwischen zwei mechanisch ruhenden, d. h. in ihrer gegenseitigen Lage unverändert gedachten Stromkreisen ohne Zuhülfenahme jeder mechanischen Bewegung als Wechselinduktion abzusondern. Während also in jenen Fällen sowohl Felder von permanenten Magneten als auch von Strömen bezw. Elektromagneten in Frage kamen nur mit der Voraussetzung, dass für den Fall reiner Bewegungsinduktion ohne Mischung mit Wechselinduktion die Felder an sich während der Induktionsbetrachtung als konstant angesehen werden konnten oder zum mindesten konstanten Felderregungsstrom aufwiesen, werden die unter die „Wechselinduktion" eingereihten Fälle nur variable Stromfelder oder genauer durch variablen Strom erzeugte Felder umfassen. Um zu zeigen, dass auch hier Misch- oder Übergangserscheinungen auftreten können, sodass hin und wieder keine völlige scharfe Selbsttrennung der Fälle vorliegt, bedarf es nur des Hinweises auf

die Induktionsmotoren, sowie die Erregung von Wechselstromdynamos mit variablem Gleichstrom. Immerhin bietet diese Unterscheidung so viel Vorteile, dass sich eine Beibehaltung der Einteilung nach diesem Gesichtspunkt empfiehlt. Die grosse praktische Bedeutung dieser Art von Spannungserregung in der Wechselstromtechnik für die Umformung elektrischer Energie bezw. Leistung unter nahezu beliebiger gegenseitiger Änderung der Faktoren-spannung E, Stromstärke J in dem — einschliesslich der relativ kleinen Umsetzungsverluste konstanten — Leistungsprodukte $E \cdot J$ spricht auch für eine Sonderbehandlung. Im übrigen ist unter vorläufiger Zurückstellung der energetischen Betrachtungen die grundlegende Erscheinung der Spannungserregung im induzierten Leiterkreis bei Wechselinduktion, ebenso wie im vorhergehenden Fall der Bewegungsinduktion, unabhängig von einem aus ihr folgenden elektrischen Ausgleich (Strom) oder von dessen Stärke, eine etwaige Rückwirkung derselben auf das induzierende Feld ausgenommen. Letztere soll aber hier noch nicht näher berücksichtigt werden, so wichtig sie für die speziellere Theorie dieser Apparate ist.

Es stelle Fig. 49 das Schema für die wesentlichen Teile dar, welche bei der Wechselinduktion in Frage kommen, nämlich I den primären oder indu-

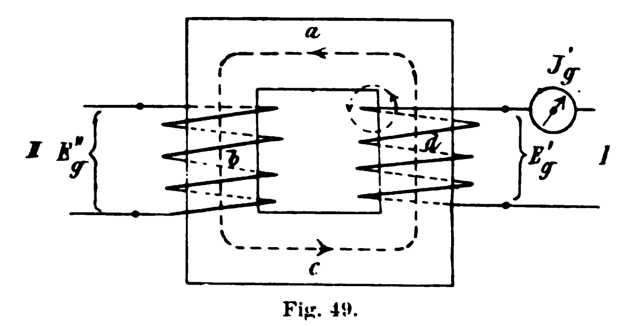


Fig. 49.

zierenden Stromkreis, welcher den (variablen) Strom J_g' führt und das variable magnetische Feld erregt, II den induzierten Leiterkreis im bisherigen Sinne (vgl. **102**), in welchem die der Betrachtung unterworfene Spannung erregt werden soll, während endlich ***a b c d*** die Bahn andeutet, in welcher das gemeinschaftliche Feld, d. h. die mit jedem der beiden Stromkreise verketteten und dadurch auch I und II untereinander verkettenden Kraftlinien verlaufen. Bereits hier wäre zu bemerken, dass auch bei geöffneter Wicklung II für eisenhaltige, sowie zu merklicher Wirbelstrombildung Veranlassung gebende magnetische Felder zwischen der von aussen zugeführten (gemessenen) Stromstärke J_g' und ihrer magnetisierend wirkenden Komponente J_μ' zu unterscheiden ist.

Bezeichnen wir das in einem bestimmten Moment vorhandene und für die Wechselinduktion allein in Betracht kommende gemeinschaftliche Nutzfeld, die bei geöffneter Wicklung II im Querschnitt b vorhandene (einfache) Anzahl Kraftlinien, mit n_g, so ist nach den früheren Ausführungen durch die einmalige Feldänderung im Querschnitt b bezw. der ganzen Wicklung II zwischen den Grenzen $n_g = o$ und dem Maximalwert N_g die Integralspannung (Spannung $\times$ Zeit) $\int_{t_0}^{t_1} e'' \, dt$ durch die Gleichung

$$\int_{t_0}^{t_1} e'' \cdot dt = w'' \cdot N_g \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \qquad (13)$$

gegeben oder bei Einführung des Kraftlinien-Mittelwertes E_N für die Spannung

$$E_N'' \cdot t_1 = w'' \cdot N_g, \quad \ldots \ldots \quad (13a)$$

wenn t_1 die Zeiteinheiten für die Feldänderung von o bis N_g angiebt (vgl. oben); für den konkreten Fall eines sinusförmigen Wechselstroms von hundert sekundlichen Wechseln (50 Perioden) wäre $t_1 = \frac{1}{200}$ Sekunde also der einfache Mittelwert

$$\tilde{E}_N'' = 200 \cdot w'' \cdot N_g \cdot 10^{-8} \text{ Volt}$$

und der effektive Mittelwert

$$\tilde{E}'' = 1{\cdot}11 \,.\, 200 \cdot w'' \cdot N_g \cdot 10^{-8} \text{ Volt},$$

wenn N_g das innerhalb jedes Wechsels erreichte maximale gemeinschaftliche Feld in Kraftlinien (CGS-Einheiten) bezeichnet. Die Grösse des veränderlichen Wertes von n_g in irgend einem Moment hängt nach dem magnetischen Ausgleichgesetz (vgl. H. 1, 2) von der MMK einerseits, den magnetischen Widerstandsverhältnissen des magnetischen Kreislaufes $a\ b\ c\ d$ andererseits ab; letztere wiederum für einen bestimmten Fall von den Dimensionsverhältnis: reduzierter Querschnitt q des Kraftlinienweges zu reduzierter Länge l, welches mit c_g bezeichnet sei, und der magnetischen Durchlässigkeit des Kreislaufes $a\ b\ c\ d$, welche mit μ_g bezeichnet sei. Da die MMK im vorliegenden Fall durch $k \cdot J' \cdot w'$ dargestellt wird, worin k eine vom Masssystem abhängige Konstante, welche z. B. für $J' \cdot w'$ in Amperewindungen $\frac{4\pi}{10}$ für das CGSSystem beträgt, so kann man allgemein für N_g setzen

$$N_g = J' \cdot w' \cdot k \cdot c_g \cdot \mu_g. \quad \ldots \ldots \quad (14)$$

Hiernach lässt sich die Gleichung (13a) schreiben

$$E_N'' \cdot t_1 = w' \cdot w'' \cdot c_g \cdot k \cdot \mu_g \cdot J'. \quad \ldots \quad (13b)$$

Fasst man die vier ersten Konstanten in eine zusammen und schreibt für diesen nur von den Wicklungsverhältnissen $w' \cdot w''$, den Dimensionsverhältnissen $\left(c_g = \frac{q}{l}\right)$ des magnetischen Kreislaufes und dem Massystemfaktor k abhängigen Koeffizienten (Wechselinduktionskoeffizienten)

$$M_1 = w' \cdot w'' \cdot c_g \cdot k \quad \ldots \ldots \quad (15)$$

so folgt

$$w'' \cdot N_g = E_N'' \cdot t_1 = M_1 \cdot \mu_g \cdot J'. \quad \ldots \quad (13c)$$

Diese Formel (13c) kann man für eine bequeme experimentelle Ermittelung von

$$(M_1 \cdot \mu_g) = M_e = \frac{E_N'' \cdot t_1}{J'} = \int_0^{t} e'' \cdot dt \cdot \frac{1}{J'} \quad \ldots \quad (16)$$

mit Gleichstrom benutzen, wenn für J' die Stromstärkeänderung eingesetzt wird.

Für die Bestimmung mit Wechselstrom $\left(t_1 = \frac{1}{2z}\right)$ folgt aus (13b) und (15)

$$M_e = \frac{E_N''\, t_1}{J'} = \frac{\tilde{E}_N''}{2z \cdot i'_{max}} = \frac{\tilde{E}''}{f \cdot 2z \cdot i'_{max}} = \frac{\tilde{E}''}{\omega \cdot \tilde{J}'} \quad \cdot \cdot \quad (16a)$$

Im letzteren Falle ist zu berücksichtigen, dass M in HENRY (10^9 CGS-Einheiten) erhalten wird, wenn $\tilde{E}$ in Volt, $\tilde{J}$ in Amp. gemessen wird und der Wert $\omega = c \cdot z$ aus der Wechselzeit $\tau = \frac{1}{z}$ und $c = 2 f \cdot \sigma_i = 2 \cdot f \cdot \frac{i'_{max}}{\tilde{J}'}$ abgeleitet ist. Bei gleicher Kurvenform von $\tilde{E}''$ und $\tilde{J}'$ können auch beiderseits die effektiv gemessenen Werte eintreten. Vor allen Dingen ist aber zu berücksichtigen, namentlich bei eisengeschlossenen Transformatoren, dass in der vorliegenden Betrachtung für $\tilde{J}$ nie die volle beobachtete Leerlaufstromstärke $\tilde{J}_0$ bzw. $\tilde{J}_g$, sondern die daraus abgeleitete Magnetisierungsstromstärke $\tilde{J}_\mu = \tilde{J}_0 \sin \varphi$ einzusetzen ist, wenn φ die beobachtete äquivalente Phasenverschiebung angiebt. Näheres vgl. H. I, 2, ferner Bd. II sowie Bd. V. Bemerkt sei jedoch, dass von einem konstanten, d. h. von der Stromstärke J unabhängigen Wert des Wechselinduktionskoeffizienten $M_e = (M_1 \cdot \mu_g)$ nur für den Spezialfall die Rede sein kann, dass μ konstant ist; letzteres ist streng genommen nur bei völliger Abwesenheit von Eisen in der Umgebung der Wicklungen I und II der Fall, also für den Wert $\mu = 1$. Für die technisch wichtigeren Fälle, dass der Weg $a\ b\ c\ d$ völlig oder überwiegend aus Eisen besteht (Transformatoren) ist μ erheblich grösser als 1 (bei völligem Eisenschluss bis 2000 und darüber), aber nur innerhalb enger Grenzen angenähert konstant, sodass bei Wechselstrom für μ und somit auch für $(M_1 \cdot \mu_g)$ ein von der Stromstärke J' abhängiger, aber praktisch brauchbarer Mittelwert für den Wechselinduktionskoeffizienten des Systems eingeführt werden muss. Die Kurve, welche seine Abhängigkeit von dem Erregerstrom J', genauer $\tilde{J}_\mu$ bezw. der MMK darstellt, verläuft konform mit der Permeabilitätskurve des ganzen magnetischen Kreislaufes für Wechselstrom und fällt mit der Permeabilitätskurve der für den Kreislauf verwendeten Eisensorte nur dann zusammen, wenn der Kreislauf $abcd$ einen völlig geschlossenen, homogenen Eisenweg von angenähert konstantem Querschnitt q ohne merklichen Fugen- bezw. Luftwiderstand darstellt; anderenfalls kann der oben in Frage kommende Wert sehr stark herabgedrückt werden und eine ganz andere Grössenordnung erhalten, z. B. für sogenannte Igeltransformatoren oder ähnliche Konstruktionen wie Induktorien weit unter den Wert 100 sinken und in gleichem Sinne der Wert des effektiven Induktionskoeffizienten $M_e = (M_1 \cdot \mu_g)$ beeinflusst werden, da M_1 konstant ist, d. h. unabhängig von den magnetischen Eigenschaften des Systems (näheres vgl. im Abschnitt über Magnetismus).

Aus der Umkehrbarkeit der Rolle von Wicklung II und I, sowie der naturgemässen Übereinstimmung des gemeinschaftlichen Wertes für den Wechselinduktionskoeffizienten $M_e = (M_1 \cdot \mu_g)$ bei entsprechenden Betriebsverhältnissen, d. h. gleichem Wert von N_g folgt für die Spannungserregung in I bei Felderregung durch Wicklung II analog der Gleichung (13)

$$w' \cdot N_g = \int e' \cdot dt \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (17)$$

$$w' \cdot w'' \cdot c_g \cdot k \cdot \mu_g \cdot J_0'' = E_N' \cdot t_1 \quad . \; . \; . \; . \quad (17\text{a})$$

$$M_1 \cdot \mu_g \cdot J_0'' = E_N' \cdot t_1 . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (17\text{b})$$

Die Gleichsetzung von $M_1 \cdot \mu_g$ in Gleichung (13c) und (17b) liefert die für Transformatoren wichtige Grundgleichung

$$\frac{E'}{J''} = \frac{E''}{J'} \text{ oder } \frac{J'}{J''} = \frac{E''}{E'}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (18)$$

d. h. die Magnetisierungsstromstärken der beiden Wicklungen verhalten sich umgekehrt wie die Spannungen. Hierbei ist allerdings vorausgesetzt, dass die Spannungsverhältnisse bei beiden Wicklungen gleich sind, denn die für die erste Abstraktion bei gut geschlossenen Eisenwegen zulässige Annahme, dass das für die Wechselinduktion allein in Frage kommende, beiden Wicklungen gemeinschaftliche Feld N_g (Nutzfeld) mit dem Gesamtfeld N_1 der felderregenden Wicklung identisch ist, ist praktisch nicht zutreffend, und zwar um so weniger, je mehr die magnetische Durchlässigkeit des beide Wicklungen w' und w'' (vgl. Fig. 49) verkettenden Weges $a\ b\ c\ d$ gegenüber anderen möglichen Ausgleichbahnen der von $w' \cdot J'$ erzeugten Kraftlinien abnimmt. Für zunächst offenen Stromkreis von *II* wird von den durch Wicklung *I* erzeugten Kraftlinien N_1' die Zahl N_g, welche auch Wicklung *II* durchsetzt, immer kleiner und kleiner werden, d. h. das Verhältnis $\frac{N_g}{N_1'}$ immer mehr abnehmen, je kleiner der Wert μ des $a\ b\ c\ d$ wird, da die ganze übrige Umgebung die konstante magnetische Durchlässigkeit $\mu = 1$ beibehält. Da man nun in der Technik bei der Wechselinduktion das wirtschaftliche Ziel verfolgt, möglichst alle von *I* erzeugten Kraftlinien für die Wechselinduktion, d. h. Spannungserregung in *II* auszunutzen, so wird der Wert $\frac{N_g}{N_1'}$ den Wirkungsgrad der Konstruktion nach dieser Richtung ausdrücken, oder andererseits, in Übereinstimmung mit den Ausführungen in 101, $N_s' = (N_1' - N_g)$ das Streufeld von Wicklung *I* bezogen auf *II* angeben, oder das Fehlprodukt $N_s' \cdot w_I$ die „Streuung“.

Als „Streuungskoeffizient“, welcher für Konstruktionen eine wichtige Rolle spielt, aber noch keine einheitliche, durch Übereinkommen festgelegte Definition erfahren hat, wird bald jenes Verhältnis $\frac{N_g}{N_1'}$, bald der reciproke Wert $\frac{N_1'}{N_g}$, bald auch endlich das Verhältnis $\frac{\text{Streulinien}}{\text{erzeugte Kraftlinien}} = \frac{N_s'}{N_1'}$ definiert. Der Wortbildung nach scheint das letztgenannte Verhältnis auf die Benennung als Streuungskoeffizient wohl das meiste Anrecht zu haben. Wie man im Vergleich mit dem früheren sieht, ist bei dieser Formulierung bereits eine Abstraktion bezw. Reduktion für den Wert N_1 vorausgesetzt, denn genau genommen haben wir es hier nicht nur mit der Streuung von Wicklung *I* bezogen auf *II* zu thun, sondern noch weiterhin mit der sogleich bei der Selbstinduktion näher zu behandelnden Streuung der Wicklung *I* bezogen auf sich selbst, d. h. mit der Thatsache, dass nicht alle von Wicklung *I* erzeugten Kraftlinien mit allen Windungen von *I* verkettet sind.

105. Spannungserregung durch Selbstinduktion.

Der nahe Zusammenhang, ja die teilweise Identität dieser Streuung mit dem Begriff der Selbstinduktion lässt diese beiden Spezialisierungen der Induktion bei allen praktischen Fällen so miteinander verschmolzen erscheinen, dass auch eine teilweise gemeinschaftliche Behandlung sich nicht gut umgehen lässt, ohne dem Gegenstand Gewalt anzuthun. Dies ergiebt sich bei genauerem Zusehen schon aus der Thatsache, dass die Erscheinung der Selbstinduktion eigentlich die allgemeinste Induktionserscheinung ist und weniger Vorbedingungen für ihr Auftreten hat, als die Bewegungs- und die Wechsel-

induktion, so dass die letztere ohne gleichzeitige Selbstinduktionserscheinungen nicht denkbar ist, wohl aber umgekehrt.

Die Richtigkeit des obigen allgemeinen Induktionsgesetzes

Erregte Spannung = Feldänderung im Leiterkreis

als erwiesen angenommen, lässt sich aus ihm der Beweis für die Behauptung des letzten Satzes ohne weiteres ableiten: Da das Zustandekommen jedes elektrischen Stromes untrennbar mit demjenigen eines magnetischen Stromfeldes verknüpft ist, welches mit dem den Strom führenden Leiterkreis verkettet ist, d. h. ihn durchsetzt, so muss jede Stromänderung von einer Änderung dieses Feldes im Leiterkreis und damit der Erregung (Induktion) einer Spannung im eigenen Leiterkreis begleitet sein. Diese Eigenerregung (EMK der Selbstinduktion) wird daher auch in allen von einer sogenannten konstanten Stromquelle, z. B. Batterie gespeisten Leiterkreisen neben dieser primären EMK auftreten, sobald Ursache zu einer Stromänderung gegeben ist. Letzteres ist z. B., abgesehen von anderen Fällen wie der Erregung von Wellenstrom durch periodische Widerstandsveränderung zwischen bestimmten Grenzen, stets bei Einleitung und Unterbrechung des stationären Gleichstromzustandes der Fall. Wenn diese zeitlich meist rasch vorübergehenden Erscheinungen anfangs die Aufmerksamkeit nicht oder nur in ganz besonderen Fällen, nämlich bei dem Erfordernis sehr grosser Werte der Feldänderung im Leiterkreis ($N = N_1 \cdot w$), erregten, so thut das der Allgemeinheit ihres Auftretens keinen Abbruch; um so nachdrücklicher lenkte dafür diese Thatsache die Aufmerksamkeit auf sich, als diese Erscheinung bei der Verwendung von Wechselstrom mit fortwährender und rascher Veränderung der momentanen Stromwerte auch einen dauernden und vielfach sehr starken Einfluss geltend machte. Hier hatte man umgekehrt Mühe, Leiterkreise mit zwar nicht völliger aber, weil letzteres unmöglich, doch praktisch ausreichender Freiheit von „Selbstinduktion“ herzustellen, um ihren für viele Zwecke, namentlich die der Messung, störenden Einfluss zu beseitigen.

Die Notwendigkeit des jederzeitigen Auftretens von Selbstinduktion bei Wechselinduktionserscheinungen, ja ihr teilweises Verschmelzen und ineinander Übergehen lässt sich auch gut an der Fig. 49 verfolgen, wobei zu bemerken ist, dass alle diese wie auch die vorausgegangenen Betrachtungen über Wechsel- und Selbstinduktion durch irgend eine andere Anordnung der Wicklungen *I* und *II* zwar quantitativ aber nicht qualitativ geändert werden. Die in Fig. 49 wegen ihrer Übersichtlichkeit gewählte Anordnung, wenn sie auch praktisch bezüglich des Wirkungsgrades $\left(\frac{N_2}{N_1}\right)$ der Wechselinduktion ungünstig ist, gestattet unschwer alle diese Betrachtungen auf die Anordnung von *I* und *II* nebeneinander, ineinander, oder endlich jede in verschiedene Teilwicklungen aufgelöst abwechselnd durcheinander anzuwenden. Bedient man sich der von Faraday entwickelten Vorstellung, dass bei Stromänderung in einem Leiter von seiner Querschnittsmitte aus Kraftlinien — sich beim Anwachsen des Stromes konzentrisch erweiternd — auslaufen bezw. beim Abnehmen — sich ebenso verengernd — nach der Mitte des Leiterquerschnitts zusammenlaufen, so führt dies zu dem gleichen Ergebnis, als wenn man die abstrakten Kraftlinien Faradays durch die konkreteren Wirbelfäden Maxwells ersetzt. Die Wirbelachsen der letzteren bewegen sich wie jene Kraftlinien, nur

dass ihre Ausbreitung vom Leiterquerschnitt aus gleichzeitig die als Begleiterscheinung der Stromänderung auftretende elektromagnetische Welle verkörperlicht. Fasst man einen solchen Leiterquerschnitt ins Auge, z. B. in Fig. 49 von der Wicklung *I* denjenigen der obersten Windung innen, so würde beim Anwachsen von J' eine Ausbreitung der punktiert angedeuteten Kraftlinie oder der Energie in Form einer (magnetische) Wirbelintensität übertragenden elektromagnetischen Welle stattfinden, bis eine Bahn relativ kleinsten magnetischen Widerstandes für die Kraftlinie, bezw. grösster Aufnahmefähigkeit (Susceptibilität) an magnetischer Wirbelintensität für den Wirbelfaden erreicht ist. Für die weitaus grösste Zahl der Kraftlinien, bezw. für den grössten Teil der Wirbelintensität wird diese Bedingung die Bahn *a b c d* erfüllen, falls wir uns dieselbe für die folgende Betrachtung als geschlossenen Eisenweg mit grosser magnetischer Durchlässigkeit in einer verhältnismässig magnetisch schlecht leitenden Umgebung vorstellen (letztere mit μ praktisch $= 1$, aber nicht magnetisch völlig isolierend, da die übliche aber leicht irreführende Bezeichnung „unmagnetisch" nicht absolut, sondern nur relativ zu verstehen ist). Abstrahiert man auch für das Folgende zunächst von dieser stets vorhandenen und die Erscheinung der „Streuung" verursachenden magnetischen Nebenleitung, indem man sie im vorliegenden Fall als relativ sehr klein annimmt, so müssen alle für die Haupterscheinung in Frage kommenden Kraftlinien, um in der Bahn des magnetischen Kreislaufes *a b c d* zur Ruhe zu kommen, nicht nur alle Windungen von *II*, sondern, wie die in Gedanken verfolgte Ausbreitung des kleinen punktierten Kreises zu dem grösseren zeigt, auch die von *I* schneiden. Neben der bei einmaligem Anwachsen des Kraftlinienfeldes von o bis N_g in Wicklung *II* durch Wechselinduktion erzeugten Spannung $w'' \cdot N_g \cdot \frac{1}{t} = E_N''$, wird sonach in der Wicklung *I*, welche den das Feld erregenden Strom führt, eine Spannung von dem Betrage $w' N_g \cdot \frac{1}{t} = E_N'$ durch „Selbstinduktion" erzeugt werden müssen. Die Richtung dieser Spannung ergiebt sich (nach der „rechten Handregel" vgl. **103** ermittelt) als dem anwachsenden Erregerstrom J' bezw. der diesen erzeugenden Primärspannung E' bei Einschaltung entgegengesetzt gerichtet, bei Ausschaltung gleichgerichtet; doch bedarf es dieser Nachprüfung eigentlich gar nicht, da nach dem Prinzip von Wirkung und Gegenwirkung diese Richtung ohne weiteres und gleichsam gefühlsmässig fest steht, indem eine bei Einschaltung, d. h. anwachsendem J' eintretende Selbstinduktionsspannung in gleicher Richtung wie der Strom diesen immer weiter ins Ungemessene steigern müsste, also zu einem Unsinn führt. Diese Selbstinduktionsspannung kompensiert also, solange J' veränderlich ist, einen mehr oder weniger grossen Teil, mitunter sogar (wie bei Transformatoren) praktisch die ganze von aussen zugeführte Spannung, da beide, d. h. zugeführte Spannung und Gegenspannung der Selbstinduktion, sich nur um die meist sehr kleine (und ausserdem aus geometrischer Zusammensetzung sich ergebende vgl. **106**) Differenz unterscheiden, welche nach dem Ohmschen Gesetz die Stromstärke J_a' in der Wicklung *I* erzeugt.

106. *Zusammenhang von Wechsel- und Selbstinduktion.*

Das Verständnis des Verhältnisses zwischen Wechselinduktion und Selbstinduktion dürfte noch durch folgende Überlegung unterstützt werden: Aus der vorausgegangenen Betrachtung ergab sich, dass nicht nur das Feld N_g für die Wechselinduktion und Selbstinduktion — unter Abstraktion von

dem Streufeld ($N_1' - N_g$) — dasselbe ist, sondern dass auch für eine aussen offene Wicklung *II* (leerlaufender Transformator) das Vorhandensein oder Nichtvorhandensein einer oder mehrerer sekundärer Wicklungen ganz gleichgiltig für die Selbstinduktionserscheinungen in *I* ist. Zwar bestimmen nach (13a) und (17) die Wicklungszahlen w' und w'' das Verhältnis von Wechselinduktionsspannung $\left(E_N'' = N_g \cdot w'' \cdot \frac{1}{t}\right)$ und Selbstinduktionspannung $\left(E_N' = N_g \cdot w' \cdot \frac{1}{t}\right)$ zu

$$E'' : E' = w'' : w' \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (19)$$

doch wird der elektrische Ausgleichvorgang in *I* nur durch die Selbstinduktion von *I* bedingt. Eine Rückwirkung von *II* auf *I* vermittelst der Wechselinduktion tritt erst bei äusserer Schliessung von *II* hinzu und veranlasst nunmehr in der Gleichung für die Kompensation der Primärspannung eine Teilung des Begriffes der Selbstinduktion, der ohne Zuziehung der Sekundärwicklung eine einheitliche Behandlung zulässt. Diese Teilung kann auch schon vorher durch Hinzuziehung des thatsächlich stets vorhandenen Streufeldes der Wicklung *I*, welches in vielen praktischen Fällen (bei ungenügender magnetischer Verkettung zwischen *I* und *II*) sehr erheblich wird, in der Weise erfolgen, dass man die Kraftlinien, die die Wicklung von *I* durchsetzen in solche teilt, welche auch durch Wicklung *II* gehen und solche, welche sich schliessen ohne mit *II* verkettet zu sein. Eine teilweise Verkettung wird wiederum am besten durch Reduktion auf ein mittleres Kraftlinienfeld N_g von gleichem Produkt $N_g \cdot w''$ wie jene Summe aller einzelnen Windungskraftlinien berücksichtigt werden. Letzteres geschieht, indem man die mit den einzelnen Windungen, welche von a bis w numeriert seien, verketteten wirklichen Kraftlinienzahlen

$$N_a + N_b + N_c + \cdots N_w = N_g \cdot w \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (20)$$

setzt, so dass sich

$$N_g = \frac{1}{w}(N_a + N_b + N_c \cdots N_w) \text{ ergiebt} \quad . \quad . \quad . \quad (20a)$$

Zunächst kann so das gesamte mit *I* verkettete Feld $N_1' = \frac{N'}{w'}$ in ein Wechselinduktionsfeld N_g und ein Streufeld $N_s' = (N_1' - N_g)$ von Wicklung *I* bezogen auf *II* zerlegt werden. Diese Zerlegung ist deshalb praktisch wichtig, namentlich für Wechselstrom (vgl. Theorie der Transformatoren), weil bei konstanter Primärspannung — konstant bei periodischem Wechselstrom natürlich in dem Sinne von gleich bleibendem Verlauf in den einzelnen Perioden oder was dasselbe sagt, von gleichbleibendem effektiven Mittelwert — und bei Strombildung in *II* durch Schliessen dieses Leiterkreises das gemeinschaftliche Wechselinduktionsfeld N_g eine Art gegenseitiger Bindung von J' und J'' oder richtiger eine Ausbalanzierung hinsichtlich ihrer magnetisierenden Wirkung bewirken muss. Denn nur bei angenäherter Konstanz von N_g ist nach der obigen Spannungsgleichung eine Kompensierung der konstanten zugeführten Spannung möglich — hinreichende Kleinheit des Ohmschen Spannungsabfalles und mässige Streuung von *I* bezogen auf *II* vorausgesetzt. Dieser zweite Teil von N_1' nämlich das Streufeld N_s' wird hingegen nicht konstant bleiben, sondern angenähert

proportional mit J' zunehmen, solange die Permeabilität von $a\,b\,c\,d$ angenähert konstant bleibt. Es werden also im Primärkreis (anschliessend an die allgemeine Induktionsgleichung) folgende Gleichungen für die Kompensation der zugeführten Spannung sich ergeben, wenn man, um die algebraische Summenbildung der Spannungskomponenten zu ermöglichen, die Aufstellung zunächst für die Momentanwerte e bezw. i vornimmt:

$$e_g' = \frac{dN'}{dt} + i_g' \cdot R', \quad \text{(21)}$$

wenn Index g sich bei Spannung und Stromstärke auf die an bezw. vor den Klemmen gemessenen Werte bezieht (vgl. Fig. 49)

$$e_g' = w' \cdot \frac{dN_1'}{dt} + i_g' \cdot R' \quad \text{(21a)}$$

$$e_g' = w' \left[\frac{dN_g}{dt} + \frac{dN_s'}{dt}\right] + i_g' \cdot R'. \quad \text{(21b)}$$

Der primär zugeführten Spannung (e_g') wird also in jedem Moment durch drei Gegenspannungskomponenten das Gleichgewicht gehalten. Vom wirtschaftlichen Standpunkt aus erscheinen zwei derselben, nämlich der OHMsche Spannungsabfall in der Primärwicklung $e_R' = i_g' \cdot R'$ und die primäre Streuungskomponente

$$e_s' = w' \cdot \frac{dN_s'}{dt} = w' \cdot \frac{d}{dt}\,(w' \cdot i_g' \cdot k \cdot c_s' \cdot \mu_s') \quad \text{(22)}$$

als Verluste oder Unkosten, die dritte mit Hülfe des Wechselinduktionsfeldes N_g zur Umsetzung gelangende Komponente

$$e' = w' \cdot \frac{dN_g}{dt} = w' \cdot \frac{d}{dt}\,(w' \cdot i_\mu' \cdot k \cdot c_g \cdot \mu_g) \quad \text{(23)}$$

als Nutzspannung, woraus das Bestreben die ersteren möglichst klein zu machen ohne weiteres klar wird. (Über die Auflösung von N_g bezw. N_s siehe **104** bezw. **107**).

Mit dem Übergang von den praktisch nicht brauchbaren Momentanwerten zu den Mittelwerten (vgl. oben), ist wegen der zeitlichen Versetzung (Phasenverschiebung) zwischen den Maximalwerten der Komponenten, welche im Polardiagramm durch den Winkelabstand (φ') der Spannungspfeile (vgl. Fig. 50) ausgedrückt ist, der Übergang von der algebraischen Summation zur geometrischen untrennbar verknüpft, so dass bei Benutzung der effektiven Mittelwerte die Zerlegung der zugeführten Primärspannung E_g' sich durch folgende Schreibweise wiedergeben liesse

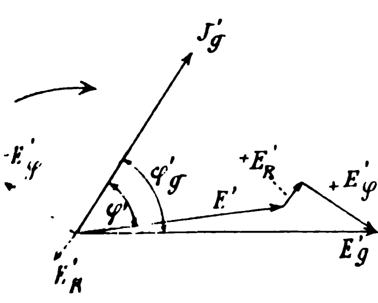


Fig. 50.

$$E_g' \begin{cases} J_g' \cdot R' = E_R' \quad \ldots \ldots \ldots \quad (24) \\ w' \cdot \dfrac{dN_s'}{dt} = E_S' \\ w' \cdot \dfrac{dN_g}{dt} = E' = \dfrac{w'}{w''} \cdot E'' \begin{cases} E_R'' = J_g'' \cdot R'' \\ E_S'' = w'' \dfrac{dN_s''}{dt} \\ E_g'' \end{cases} \end{cases}$$

Hierbei ist die Zerlegung der in Wicklung *II* durch Wechselinduktion erregten Spannung $E'' = w'' \cdot \frac{dN_g}{dt}$ (vgl. oben) für den Fall der äusseren Schliessung von *II* unter Ermöglichung der Ausgleichstromstärke J_g'' angefügt, um den vollständigen Übergang von E_g' zu E_g'' zu verdeutlichen (vgl. ETZ 1899, 206). Die Zerlegung der im Leiterkreis *II* aktiv wirksamen Spannung (EMK) E'' erfolgt also in ganz analoger Weise, wie diejenige von E_g', da die beiden Verlustkomponenten $E_R'' = J_g'' \cdot R''$ und $E_S'' = w'' \cdot \frac{dN_s''}{dt} = w'' \frac{d(w'' \cdot J_g'' \cdot k \cdot c_s'' \cdot \mu_s'')}{dt}$ in ganz analoger Weise erst gedeckt werden müssen, ehe nach Abzug der sekundären Spannungsunkosten die sekundäre Nutzspannung E_g'' an den Klemmen abgegeben werden kann. E_g'' erhält hierbei eine analoge Stellung wie die Umsetzungsspannung E' aus der Zerlegung von E_g', da infolge völlig symmetrischen Verhaltens der beiden Wicklungen *I* und *II* in qualitativer Hinsicht eine Umkehrung beim Durchlaufen des Vorgangs in derselben Richtung eintreten muss. Dieser auch allen optischen Spiegelungen eigenartige Charakter kommt in der obigen Darstellung der Verhältnisse durch die Stellung von E_g' und E_g'' zum Ausdruck, nämlich $E_g' \cdots E' \mid E'' \cdots E_g''$.

Dass für $J_g'' = o$ die erregte Sekundärspannung $E'' = E_g''$ der Klemmenspannung wird, ist ohne weiteres einleuchtend.

Bemerkenswert bleibt aber noch die Folge der schon oben angedeuteten Ausbalanzierung der Stromstärken J_g' und J_g'' in magnetischer Hinsicht. Bei beliebiger sekundärer Belastung, d. h. beliebig grossen Werten der Stromstärken J_g' und J_g'' werden nur die beiden Verlustglieder jeder Seite des Transformators direkt proportional beeinflusst, wie auch die vorstehenden Gleichungen erkennen lassen, während die innere Spannungsumsetzung davon unbeeinflusst bleibt, oder doch wenigstens nur indirekt durch jene beeinflusst wird, eine Rückwirkung, die sich innerhalb der praktischen Grenzen klein halten lässt. Der Wechsel der Belastung, d. i. Variation von J_g'' in weiten Grenzen wirkt sonach auf die inneren Spannungsverhältnisse nur unwesentlich ein, sodass sich die wesentliche Änderung nur auf die energetischen Verhältnisse erstreckt; die letzteren in Gestalt der Leistung, welche durch die elektromagnetische Welle des gemeinschaftlichen Feldes N_g auf die Wicklung *II* übertragen wird, werden allerdings, wie die Gleichung der zur Umsetzung gelangenden elektrokinetischen Leistung $W' = \tilde{E} \cdot \tilde{J} \cdot \cos \varphi$ erkennen lässt, bei angenäherter Konstanz des Druckfaktors $\tilde{E}$ allein von der Grösse der Verschiebungsmöglichkeit $\tilde{J}$ abhängen in Verbindung mit der bei periodischen Ausgleichvorgängen wichtigen Phasenverschiebung φ, Verhältnisse die jedoch an anderer Stelle näher behandelt werden (vgl. H. I, 2 in **157**).

107. Formulierung und

Die Auflösung oder Zurückführung der für die Spannungsverhältnisse wichtigen magnetischen Felder N_g und N_s in die sie bestimmenden Einzelfaktoren

Sinn der Induktionskoeffizienten.

mit Hülfe des magnetischen Ausgleichgesetzes, wie sie bereits in den obigen Gleichungen angegeben ist, findet sich in weiterer Ausführung zwar auch bei den magnetischen Erscheinungen, sei aber hier wegen der Zusammenfassung der konstanten Einzelfaktoren zu Induktionskoeffizienten bereits herangezogen. Löst man unter Benutzung analoger Symbole, wie bei der Bildung des Wechselinduktionskoeffizienten (vgl. **104**, Gl. (14) und (15), wo

$$M_1 = w' \cdot w'' \cdot c_g \cdot k \text{ und } N_g = J_\mu' \cdot w' \cdot k \cdot c_g \cdot \mu_g \text{ gesetzt wurde,}$$

auch N_s' auf, indem man mit c_s' jene reduzierten Dimensionsverhältnisse $\left(\frac{q_s}{l_s}\right)$ des Streufeldes bezeichnet und mit μ_s seine magnetische Durchlässigkeit, welche zuweilen den Wert 1 besitzt ($\mu = 1$ für unmagnetisches Material), so folgt (aus Gl. 21)

$$e_g' = i_g' \cdot R' + \underbrace{w' \cdot w' \cdot k \cdot c_g}_{L_{g1}} \frac{d}{dt}(\mu_g \cdot i_\mu') + \underbrace{w' \cdot w' \cdot k \cdot c_s}_{L_{s1}} \cdot \frac{d}{dt}(\mu_s \cdot i_g') \quad (25)$$

$$e_g' = i_g' \cdot R' + L_{g1} \cdot \frac{d}{dt}(\mu_g \cdot i_\mu') + L_{s1} \cdot \frac{d}{dt}(\mu_s \cdot i_g'). \quad . \quad (25a)$$

Diese allgemein giltige Gleichung lässt sich für viele Fälle noch weiter vereinfachen; nämlich wenn für μ_g ein konstant gedachter Mittelwert eingeführt wird, ebenso für μ_s, so folgt bei Bezeichnung von $(L_{g1} \cdot \mu_g)$ mit L_g und von $(L_{s1} \cdot \mu_s)$ mit L_s

$$e_g' = i_g' \cdot R' + L_g \cdot \frac{d i_\mu'}{dt} + L_s \cdot \frac{d i_g'}{dt} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (25b)$$

Handelt es sich endlich um eisenfreie Wicklungen, so dass $i_\mu = i_g$, was praktisch auch schon für jeden magnetisch offenen Kreislauf wie Igeltransformator, Induktorium u. s. w. sehr nahe zutrifft, so folgt

$$e_g' = i' \cdot R' + (L_g + L_s) \frac{di'}{dt}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (25c)$$

wobei eine Zusammenziehung von $(L_g + L_s)$ zu L' erfolgen kann. Durch Einführung dieses einheitlichen, aber streng genommen nur für eisenfreie Stromkreise eindeutigen Selbstinduktionskoeffizienten L' für den ganzen Leiterkreis ergiebt sich endlich die einfachste Formulierung für die Zerfällung der gesamten aktiven Spannung e_g (EMK) in die beiden Komponenten: zur Überwindung des elektrischen Reibungswiderstandes einerseits, der Selbstinduktion andererseits. Auch hier muss mit dem Übergang von den Momentanwerten zu den Mittelwerten derjenige von der algebraischen zur geometrischen Zusammensetzung verknüpft sein, also

$$e_g' = i' \cdot R' + L' \cdot \frac{di'}{dt} \text{ bezw. } E_g' \begin{cases} J' \cdot R' \\ J' \cdot \omega \cdot L' \end{cases} \quad (25d)$$

was für den speziellen Fall der eisenfreien Wicklungen zur rechtwinkligen Zusammensetzung der Komponenten führt (weiteres siehe H. I, 2), also

$$E_g' = \sqrt{(J' \cdot R')^2 + (J' \cdot \omega \cdot L')^2} = J' \sqrt{(R')^2 + (\omega \cdot L')^2}. \quad (25e)$$

Die zuerst von HELMHOLTZ im Jahr 1851 (POGG. Ann. 83, 505—540) aufgestellten allgemeinen Gleichungen für mehrere sich gegenseitig induzierende Stromkreise seien noch der Vollständigkeit halber hier angeführt, obwohl dieselben keine praktische Verwendbarkeit besitzen und auch die darin verwendeten Koeffizienten keine unzweideutige Bestimmung zulassen. Bei Bezeichnung der n verschiedenen sich gegenseitig beeinflussenden Leiterkreise durch die untern Indices 1 bis n, der Selbstinduktionskoeffizienten mit L und der Wechselinduktionskoeffizienten mit M, wobei $M_{2,3} = M_{3,2}$ denjenigen zwischen Stromkreis 2 und 3 bezeichnen soll, so erhält man

$$e_1 = i_1 \cdot R_1 + L_1 \cdot \frac{d i_1}{d t} + M_{1,2} \frac{d i_2}{d t} + \cdots\cdot M_{1,n} \frac{d i_n}{d t} \quad . \quad . \quad (26)$$

$$e_2 = i_2 \cdot R_2 + L_2 \cdot \frac{d i_2}{d t} + M_{2,1} \frac{d i_1}{d t} + \cdots\cdot M_{2,n} \frac{d i_n}{d t}$$

$$e_n = i_n \cdot R_n + L_n \cdot \frac{d i_n}{d t} + M_{n,1} \frac{d i_1}{d t} + \cdots\cdot M_{n,n-1} \frac{d i_{n-1}}{d t}.$$

Versucht man diese Gleichungen auf den einfachen Fall eines Transformators anzuwenden, so führt dies auf Schwierigkeiten, selbst wenn man von dem nicht ausführbaren Übergang auf die Mittelwerte bei der algebraischen Zusammensetzung, sowie von den Komplizierungen durch das Vorhandensein magnetischer Materialien im magnetischen Kreislauf absieht. Für den in Fig 49 skizzierten Fall der beiden Wicklungen I und II reduziert, gäbe obiges Gleichungssystem unter Benutzung der früheren Indices

$$e' = i' \cdot R' + L' \cdot \frac{d i'}{d t} + M \frac{d i''}{d t} \cdot \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (26a)$$

$$e'' = i'' \cdot R'' + L'' \cdot \frac{d i''}{d t} + M \frac{d i'}{d t}.$$

Wird wie hier nur eine Spannung $e_1' = e'$ von aussen zugeführt, so ist die für den zweiten Stromkreis treibende Spannung (EMK) durch $M \cdot \frac{d i'}{d t}$ dargestellt, also e'' der Grösse nach die Klemmenspannung, wenn man schreibt

$$e'' = M \frac{d i'}{d t} - i'' R'' - L'' \frac{d i''}{d t} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (27)$$

alsdann würde $L'' \frac{d i''}{d t}$ die in der voran-gegangenen Darstellung als E_s' bezeichnete Streuungskomponente und L'' der als Selbstinduktionskoeffizient der Streuung abgetrennte Teilkoeffizient $n'' \cdot n'' \cdot k \cdot c_s''$ sein (vgl. Gl. 22 und 24).

Misslich und unklar gestalten sich aber die Verhältnisse im Primärkreis durch die Einführung des $M \frac{d i''}{d t}$ als Teilspannung zur Kompensation der primär zugeführten Spannung $e' = e_1'$. Vergleicht man die auf den Primärkreis bezügliche Spannungsgleichung [illegible] der Zerlegung der Spannung e_1' der Gl. 25 [illegible]

gegenüber der vorausgegangenen Kraftliniendarstellung die Einführung der variablen sekundären Belastung J'' bezw. $\frac{d\,i''}{d\,t}$ als kompensierende Komponente. Hiernach wäre für $J'' = o$, d. h. sekundär offenen Transformator $\frac{d\,i''}{d\,t} = o$ in Übereinstimmung mit Gl. (25d)

$$e' = i' \cdot R' + L' \frac{d\,i'}{d\,t},$$

also der hier als Selbstinduktionskoeffizient L' eingeführte Wert durch die gesamte mit I verkettete Kraftlinienzahl $w' \cdot w' \cdot k \cdot (c_g' + c_s')$, d. h. durch das gemeinschaftliche Feld N_g und das primäre Streufeld N_s' bedingt (vgl. Gl. 21). Bei zunehmender Belastung, d. h. $i'' > 0$ würde durch das Wachsen des Gliedes $M \frac{d\,i''}{d\,t}$ bei konstantem Wert von e' (oder auch von dem wenig davon abweichenden $e' - i'\,R'$) der Wert von $L' \cdot \frac{d\,i'}{d\,t}$ ständig abnehmen müssen und damit L' gar keinen eindeutigen Sinn behalten können, da es sich schliesslich dem Wert $w' \cdot w' \cdot k \cdot c_s'$ immer mehr nähern müsste und je nach der sekundären Belastung in den ausserordentlich weiten Grenzen zwischen $w' \cdot w' \cdot k \cdot (c_g' + c_s')$ und $w' \cdot w' \cdot k \cdot c_s'$, d. h. etwa um den zehnfachen Betrag des letzteren Wertes oder darüber variiren würde; dieser Koeffizient würde etwa dem in **108** mit L_e bezeichneten (äquivalenten) Selbstinduktionskoeffizienten entsprechen und hat als nachträglich eingeführte Kombinationsgrösse eine gewisse praktische Bedeutung, doch kann ein Mangel seiner Unterscheidnng vom eigentlichen oder reinen Selbstinduktionskoeffizienten, wie er hier vorliegt, nur verwirrend wirken. Auf das Unbefriedigende, ja das mit der oben entwickelten Kraftlinienvorstellung bezw. dem Induktionsgesetz nicht zu Vereinbarende dieser Formulierung, welches sich bei jeder näheren Beleuchtung und bei Anwendung auf konkrete Fälle herausstellt, hat der Verfasser auch schon an anderer Stelle (ETZ 1899, 175 u. ff.) hingewiesen und eine Auffassung und eine Darstellung der Vorgänge im Transformator angegeben, welche die scheinbare Abnahme der Selbstinduktion verbunden mit ihrer Überführung in Wechselinduktion befriedigender und namentlich auch bei eisenhaltigen Anordnungen brauchbar zum Ausdruck bringen dürften (vgl. auch H. I, 2).

108. Unterscheidung der Selbstinduktionsgrössen.

Auf die im Vorausgegangenen bereits mehrfach im Zusammenhang mit der Wechselinduktion berührte dritte Spezialisierung der Induktionsspannungen sei jetzt noch etwas näher eingegangen, da ihre Erscheinungen und Formulierungen zu den schwierigeren, aber für den Elektrotechniker besonders wichtigen Gebieten gehören. Vor allem sei zur Klärung darauf hingewiesen, dass man auf dem Gebiet der Selbstinduktion folgende Unterscheidungen zu treffen hat:

1) Die in diesem Abschnitt zunächst interessierende Selbstinduktionsspannung. Nach dem Vorausgegangenen wird dieselbe durch die von dem Eigenstrom des betrachteten Leiterkreises hervorgerufene Feldänderung bestimmt nach dem allgemeingiltigen Induktionsgesetz $e = -\frac{d\,N}{d\,t}$, wenn N im vorliegenden Fall alle mit dem Leiterkreis verketteten Kraftlinien bezeichnet, welche vom Eigenstrom herrühren.

2) Das Selbstinduktionsfeld mit der in **101** bei Gl. (6) angeführten Unterscheidung in das Produkt Kraftlinien $\times$ Windungen ($N = N_1 \cdot w$) und die

einfache Zahl Kraftlinien $\left(N_1 = \frac{N}{w}\right)$, welche jeden Querschnitt des magnetischen Kreislaufes durchsetzen, der von dem betrachteten Leiterkreis erzeugt und mit ihm verkettet ist.

3) Der Selbstinduktionskoeffizient L oder das Produkt der konstanten Faktoren, welche in dem Ausdruck der in ihre Grundgrössen aufgelösten Selbstinduktionsspannung vorhanden sind (vgl. Gl. 25). Hierbei sind wiederum folgende zwei Werte zu unterscheiden: a) der ursprüngliche und in den weitaus meisten Fällen wirklich konstante Selbstinduktionskoeffizient L_1, welcher ausser dem Masssystemfaktor k nur die Dimensionen des Leitersystems bezw. dessen Windungszahl w und den Ausdruck c enthält, der sich auf die Dimensionen des mit dem Leitersystem verketteten magnetischen Kreislaufes (den magnetischen Ausgleichwiderstand) bezieht, jedoch die magnetische Duchlässigkeit μ überall gleich 1 annimmt, d. h. nur sogenanntes unmagnetisches Material in der Leiterumgebung voraussetzt; b) den für die Technik weitaus wichtigeren Koeffizienten von eisenhaltigen Leiterkreisen $L = (L_1 \cdot \mu)$, welcher zwar nicht völlig konstant ist, sondern mit der Stromstärke im Leiter etwas varriirt, aber für jede Stromstärke einen praktischen Mittelwert zulässt. Im allgemeinen wird also L eine Funktion der Stromstärke im Leiterkreis sein, doch häufig, auch noch für grössere Stromstärkebereiche, so wenig variieren, dass auch für diese die weitere Bildung eines Mittelwertes noch praktischen Wert besitzt. Für den praktischen Gebrauch der Technik, d. h. für das Operieren mit Selbstinduktionsspannungen bezw. Selbstinduktionskoeffizienten eisenhaltiger Stromkreise (b) empfiehlt sich dann noch mit Rücksicht auf die Verschiedenheit zwischen Magnetisierungsstrom J_μ und zugeführtem Gesamtstrom J_g eine in allen Fällen, also auch bei einfachen Wicklungen bezw. Transformatorleerlauf $(\tilde{J}_\mu = \tilde{J}_g)$ vorzunehmende Unterscheidung in einen ideellen (L_i) und einen äquivalenten oder auch effektiven Selbstinduktionskoeffizienten (L_e). Der ideelle auf J_μ bezogene und stets die Grundlage der ganzen Erscheinung liefernde Selbstinduktionskoeffizient ist der reine Koeffizient $L_i = (L_1 \cdot \mu)$, also unvermischt mit den Ausgleichkoeffizienten, welche eine Vergrösserung der primären Stromstärke über J_μ hinaus bewirken infolge irgend welcher sekundärer Energieleistungen, wozu auch die magnetische Ummagnetisierungsarbeit (Hysteresis) zählt; der äquivalente oder auch resultierende Selbstinduktionskoeffizient L_e ist dagegen aus einer Mischung (Parallelschaltung) von L_i mit anderen Leitungskoefficienten (meist Reibungskoeffizienten) entstanden und bildet eine praktisch wichtige Hülfsgrösse zur Vereinfachung der Formulierung des elektrischen Ausgleichgesetzes; doch ist bei dieser Grösse von einer angenäherten Konstanz wie bei L_i, welches nur innerhalb derselben Grenzen variirt wie μ, gar keine Rede, da dieses L_e je nach der Mischung mit sekundären Belastungskoeffizienten zwischen den Grenzen von L_e etwas kleiner als L_i und L_e etwas grösser als Null bei induktionsfreier Belastung variirt, bei Kapazitätsbelastung sogar negativ bezw. imaginär werden kann.

4) Die als Reaktanz oder „Rückwirkung“ bezeichnete Verbindung des Selbstinduktionskoeffizienten L bezw. L_e mit dem von der Periodenzahl $\sim$ bezw. Wechselzahl z bei periodischem Wechselstrom und von der Stromkurve abhängigen Faktor (Polargeschwindigkeit, $\omega = \gamma \cdot \sim = c \cdot z$, worin $\gamma = \frac{c}{2} = \frac{i_{max}}{\tilde{J}_Q}$ oder bei effektiver Messung der Stromstärke $\frac{i_{max}}{\tilde{J}} \cdot f = \sigma_i \cdot f$

(vgl. **104**). Dieser Begriff sowie seine weiteren Zusammensetzungen mit dem Begriff der elektrischen Ausgleichwiderstände anderer Art (Reibungs- und Elastizitätswiderständen) zu dem Begriff des Wechselstromwiderstandes wird bei den elektrischen Ausgleicherscheinungen (vgl. H. I, 2) näher behandelt werden, da er die Erscheinungen der Selbstinduktion gleichsam von einem anderen Standpunkt aus betrachtet, der die hier zunächst liegende Seite der Spannungserregung durch Selbstinduktion zu ergänzen geeignet ist.

Nach den Ausführungen in **106** und **107** folgt die Selbstinduktionsspannung

$$e = \frac{dN}{dt} = w \cdot \frac{dN_1}{dt} = w \frac{d(w \cdot i \cdot k \cdot c_1 \cdot \mu)}{dt}$$

$$e = (w^2 \cdot c_1 \cdot k) \cdot \frac{d(i \cdot \mu)}{dt} = L_1 \cdot \frac{d(i \cdot \mu)}{dt}. \quad . \quad . \quad . \quad (28)$$

Hieraus ergiebt sich für den Fall, dass $\mu = 1$, der Selbstinduktionskoeffizient eisenfreier Stromkreise (siehe auch Gl. 25)

$$L_1 = (w^2 \cdot c_1 \cdot k) = \frac{e}{\left(\frac{di}{dt}\right)} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (28a)$$

oder

$$\int e \cdot dt = \int L_1 \cdot di = L_1 \int di. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (28b)$$

Bestimmt man die zu der Gesamtgrösse der Stromvariation $\int di$ gehörige Zeit t, so kann man links einen Spannungsmittelwert einführen und schreiben

$$\tilde{E}_N = L_1 \cdot \frac{\int di}{t}. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (28c)$$

Für einen periodischen Wechselstrom von z Wechseln ($\sim$ Perioden) in der S e k u n d e und mit einem innerhalb jedes Wechsels erreichten Maximalwert i_{max} der Stromstärke ist für eine S e k u n d e ($t = 1$) die gesamte Stromänderung

$$\int_0^{1\ \text{Sekunde}} di = z \cdot 2 \cdot i_{max} = z \cdot 2 \left(\frac{i_{max}}{\tilde{J}_Q}\right) \cdot \tilde{J}_Q = z \cdot 2 \left(\frac{i_{max}}{\tilde{J}}\right) \cdot \tilde{J}.$$

Setzt man wiederum $\left(\frac{i_{max}}{\tilde{J}_Q}\right) = \gamma = \frac{c}{2}$ bezw. $\left(\frac{i_{max}}{\tilde{J}}\right) = \frac{\gamma}{f} = \frac{c}{2f}$, so folgt der einfache Mittelwert der Spannung (in Volt gemessen)

$$\tilde{E}_N = L_1 \cdot c \cdot z \cdot \tilde{J}_Q = L_1 \cdot \gamma \cdot \sim \cdot \tilde{J}_Q = L_1 \cdot \gamma \cdot c \cdot \frac{\tilde{J}}{f}.$$

Setzt man $c \cdot z = \gamma \cdot \sim = \omega$, so folgt

$$\tilde{E}_N = \tilde{J}_Q \cdot \omega \cdot L_1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (28d)$$

oder Spannung und Stromstärke effektiv gemessen

$$\tilde{E} = \tilde{J} \cdot \omega \cdot L_1 \text{ Volt},$$

wenn $\tilde{J}$ in Amp., L_1 in HENRY (10^9 cm) gemessen und $\omega = 2 \cdot z \cdot \sigma_i \cdot f$ auf die Sekunde bezogen wird.

In ganz analoger Weise ergeben sich die Spannungsgleichungen bei eisenhaltigen Stromkreisen, wenn man für die magnetische Durchlässigkeit μ des magnetischen Kreislaufes (meist nicht des Eisens, vgl. **104**) einen praktischen Mittelwert einführt, der für die Grenzen der vorliegenden Magnetisierung bezw. der magnetisierenden Stromstärke i als konstant angesehen wird; alsdann ist in allen Formeln nur an Stelle von L_1 der Wert von $L_i = (L_1 \cdot \mu)$ zu setzen. Hier bei eisenhaltigen Stromkreisen ist aber, wie schon oben unter 3 angedeutet, ein Unterschied zu machen zwischen dem gemessenen Strom $\tilde{J}_g$, welcher beim Vorhandensein einer sekundären Wicklung zwischen Leerlaufstrom $\tilde{J}_0$ und dem Primärstrom $(\tilde{J}_g)_{max}$ bei Maximalbelastung variiert, und dem Magnetisierungsstrom $\tilde{J}_\mu$, welcher bei leerlaufendem Transformator oder überhaupt bei jedem Elektromagnet mit einfacher Wicklung sich zu

$$\tilde{J}_\mu = \tilde{J}_g \sin \varphi = \sqrt{\tilde{J}_g^{\,2} - \tilde{J}_r^{\,2}}$$

ergiebt, wenn $\tilde{J}_g = \tilde{J}_0$ die zugeführte Wechselstromstärke und φ der Phasenverschiebungswinkel zwischen Spannung und Strom bezw. $\tilde{J}_r$ die arbeitleistende Komponente ist. Da $\tilde{J}_\mu$ mit der Spannung variiert, also bei konstanter Umsetzungsspannung E' konstant bleibt, so ist dies auch unabhängig von der Belastung mit $L_i = (L_1 \cdot \mu)$ der Fall.

Setzt man in die Formel für die Selbstinduktionsspannung

$$\tilde{E} = \tilde{J} \cdot \omega \cdot L = \tilde{J}_\mu \cdot \omega \cdot L_i \quad \ldots \ldots \quad (29)$$

an Stelle des $\tilde{J}_\mu$ die unmittelbar gemessene Stromstärke $\tilde{J}_g$ ein, so muss für den gleichen Wert von $\tilde{E}$ und ω der Wert des letzten Faktors L natürlich entsprechend kleiner werden und zwar um so mehr abnehmen, je grösser $\tilde{J}_g$ ohne Änderung von $\tilde{E}$ wird. Dieser so rückwärts bestimmte resultierende oder äquivalente Selbstinduktionskoeffizient, welcher durch Reduzierung aller Vorgänge im Feld bezw. in sekundären Wicklungen — im erweiterten Sinne könnte man diese sekundären Ausgleichwege auch unter die Bezeichnung „Feld der Primärwicklung" fassen — auf die Hauptwicklung (Primärwicklung) entstanden gedacht werden kann, würde der oben unter 3) mit L_r bezeichnete Selbstinduktionskoeffizient sein.

Welcher Betrag der gemessenen zugeführten Spannung $\tilde{E}_g$ in diese Gleichung für die Selbstinduktionsspannung

$$\tilde{E}_L = \tilde{J}_g \cdot \omega \cdot L_e \quad \ldots \ldots \ldots \quad (30)$$

einzusetzen ist, soll später bei Behandlung der elektrischen Ausgleichvorgänge behandelt werden in Zusammenhang mit dem oben unter 4 aufgeführten Produkt $(\omega \cdot L)$, welches als ein den elektrischen Ausgleich erschwerendes bezw. bedingendes Moment richtiger in dem späteren Abschnitt einzureihen ist. Auch die spezielleren Betrachtungen über Grösse und Berechnung von Selbst-

induktionskoeffizienten gehören in spätere Abschnitte, da von den beiden Faktoren μ und L_1, welche durch Zerlegung des allgemeineren $L_i = (L_1 \cdot \mu)$ erhalten werden, der erstere (μ) durch magnetische Eigenschaften, der letztere (L_1) durch die Gestaltung des Stromfeldes bei unmagnetischer Leiterumgebung bedingt ist, und dieses Strom f e l d als untrennbare Begleiterscheinung oder besser noch als Wesensseite des elektrischen Stromes den Selbstinduktionskoeffizienten (L_1) in engeren Zusammenhang mit den Ausgleicherscheinungen bringt.

Die Zusammenwirkung von Selbstinduktionsspannungen mit Spannungen aus anderer Entstehungsursache wird auch in das Gebiet der Ausgleicherscheinungen fallen, von welchem naturgemäss die Spannungserregung durch Selbstinduktion überhaupt nicht in der Weise abgesondert werden kann, wie die vorausgegangenen Fälle der Spannungserregung. Während in der hier behandelten Reihenfolge die Ursachen der Spannungserregung bis zur Wechselinduktion nicht unbedingt mit einem elektrischen Ausgleich verbunden zu sein brauchen, ist bei der Wechselinduktion bereits ein solcher unbedingt erforderlich, d. h. Vorbedingung, wenn auch noch nicht in dem auf Spannungserregung hin betrachteten Kreis. Bei der Selbstinduktion ist das Letztere sogar das Erfordernis, so dass dieses Gebiet ein für die benutzte Einteilung nicht zu lösendes Bindeglied darstellt, wie solche stets bei näherem Zusehen in der Wirklichkeit vorhanden sind und dem nach Schachtelprinzip arbeitenden Einteilungsbestreben nur eine bedingte und nicht an allen Stellen durchgreifende Richtigkeit zu teil werden lassen, eine Thatsache, die übrigens weniger einen Nachteil einschliesst als vielmehr gegenüber der Erscheinungswelt ein beruhigendes Kontinuitätsgefühl gewährt.

B. Die Erscheinungen im elektrischen Felde.

109. Bezeichnungen und Hülfsvorstellungen.

Im Vorausgegangenen sind die verschiedenen Ursachen der Spannungserregung behandelt worden, und es wurde, wo es der gegenwärtige Wissensstand zuliess, nicht nur auf die qualitativen, sondern auch die quantitativen Beziehungen zwischen Ursache und der bisher als W i r k u n g erscheinenden elektrischen Spannung in den gegenwärtig wichtigen Formulierungen eingegangen. Wird nunmehr die elektrische Spannung als die „oberste Thatsache“ im Reiche der hier zu behandelnden Erscheinungen mit ihrer bei allen Erzeugungsarten erkannten W e s e n s gleichheit als gegeben angenommen, so würden nunmehr ihre Folgeerscheinungen anzuschliessen sein. Die Vielseitigkeit derselben, welche aus der verhältnismässig hohen Rangstellung der elektrischen Energieform gegenüber den anderen Energieformen folgt, machen zur Erleichterung der Übersicht eine systematische Einteilung der Umsetzungserscheinungen erwünscht, die mit ihrem „Herabsinken“ verknüpft sind. Wiederum wurde hier die Haupteinteilung durch das Fortschreiten von den weniger zu den mehr bedingten Folgeerscheinungen der Spannung erhalten. Die Thatsache, dass jede elektrische Spannung, unabhängig davon, ob sie von einem elektrischen Ausgleich in Gestalt eines „Stromes“ (einer elektrodynamischen Erscheinung) begleitet ist oder nicht, in der gesamten

Umgebung sogenannte elektrostatische Wirkungen ausübt, lässt die letzteren als die allgemeineren Erscheinungen voranstellen. Dies erscheint um so notwendiger, als nach den neueren Auffassungen diese Wirkungen auf einen Zwangszustand des elektrisch nichtleitenden Mittels (Dielektrikums) zurückführbar sind, welcher eigentlich nicht als einfache Begleiterscheinung bezeichnet werden kann; vielmehr ist das Wesen des elektrischen Spannungszustandes hierdurch bedingt, insofern der dielektrische Spannungszustand als Gegenseite untrennbar und notwendig mitvorhanden sein muss.

Zu der Bezeichnungsweise scheint folgende Bemerkung notwendig:

Die in der Technik allgemein gebräuchliche Bezeichnung „Spannung", bekommt mit Rücksicht auf die elektrischen Erscheinungen eine zweifache Bedeutung, ähnlich wie in der Mechanik bei flüssigen Medien, die unter einseitigem Überdruck eingeschlossen sind. Zur Vermeidung von Missverständnissen ist in Zweifelsfällen ein unterscheidendes Beiwort erwünscht, wofür sich hier am besten wohl „elektrisch" und „dielektrisch" eignen dürfte. Unter elektrischer Spannung wäre demnach die zwischen zwei ins Auge gefassten Grenzen, z. B. den beiden Kontensatorbelegungen oder irgend zwei Stromkreispunkten vorhandene elektrische Druckdifferenz zu verstehen, entsprechend der „Dampfspannung", oder dem sogenannten hydraulischen Druck; unter dielektrischer Spannung wäre die Spannung im abgrenzenden oder einschliessenden Material hier im Dielektrikum oder Isoliermaterial zu verstehen, auch entsprechend den mechanischen Wandspannungen. Wie in den mechanischen Fällen die Mediumspannung in einem zusammenhängenden Raum nach erfolgtem Ausgleich, das ist Erreichung stationärer (statischer) Verhältnisse überall dieselbe ist, hingegen die Wand- bezw. Materialspannungen je nach den Dimensionen des Raumes und der Wandstärke gleichzeitig die verschiedensten Grössen zwischen den Grenzen von nahezu Null bis zur Bruchfestigkeit aufweisen können, ebenso wird die elektrische (Medium-) Spannung auf jedem zusammenhängenden Leiter elektrostatisch dieselbe sein, hingegen die dielektrische (Material-) Spannung von der Gestaltung der dielektrischen Wand abhängen, das ist von ihrer Begrenzung durch die beiderseitigen leitenden Raumgebiete, welche die elektrische Druckdifferenz (Spannung) aufweisen. Besteht zwischen beiden Spannungen auch insofern Gleichheit, als die Summe aller dielektrischen Teilspannungen längs einer Kraftröhre zwischen je zwei Ansatzstellen an die leitenden Niveauflächen entgegengesetzt gleich der elektrischen Spannung sein muss, so kann die Verteilung des Spannungsgefälles im Dielektrikum (dielektrische Spannung auf die Längeneinheit) doch in den weitesten Grenzen variieren entsprechend der Dichte der Niveaulinien (vgl. Fig. 56). Im Folgenden soll daher bei möglichem Zweifel stets durch das Beiwort elektrisch die Mediumspannung, durch das Beiwort dielektrisch die Materialspannung gekennzeichnet werden.

Es wurde im geschichtlichen Teil bereits erwähnt (vgl. **21** und **31**), dass das isolierende Zwischenmedium, welches die beiden hinsichtlich der elektrischen Spannung korrespondierenden Körper trennt, unter dem überwiegenden Einfluss der Forschungen von Coulomb lange Zeit in der Auffassung nur eine passive Rolle spielte und vom Standpunkt der sogenannten Fernwirkungstheorie als trennendes Moment angesehen wurde, das nur mit seinen rein geometrischen Dimensionen ins Spiel kommt. Erst Faraday erkannte seine wesentliche aktive Rolle bei den elektrischen Spannungserscheinungen und bahnte die sich allmählich immer mehr durchringende Umkehrung der Auffassung hin-

sichtlich der Beteiligung an den Erscheinungen an, obwohl auch die heutige Physik noch vielfache Spuren der älteren Auffassung nicht ausreichend verwischt hat. Daher findet man auch vielfach in neueren physikalischen Darstellungen noch nicht die vollen Konsequenzen des Wechsels der Auffassung gezogen, nach welcher nunmehr der dielektrische Zwangszustand als der Kernpunkt anzusehen ist, von dem alle Betrachtungen auf diesem Gebiet auszugehen haben unter gleichzeitiger Durchdringung derselben mit den erst nach Faraday hinzugetretenen energetischen Gesichtspunkten.

110. Entwickelung der Auffassung und Stoffanordnung.

Durch die Erkenntnis der aktiven Rolle des Dielektrikums bei allen elektrostatischen Erscheinungen und somit auch bei den ponderomotorischen Wirkungen, welche auf bewegliche Teile im elektrostatischen Felde ausgeübt werden, wird eine gewisse Verschiebung in der Stoffanordnung nötig. Die bisher als Grunderfahrungsthatsachen für das ganze Gebiet der Elektrostatik benutzten Kraftwirkungen zwischen elektrisch geladenen Körpern, wie sie durch das Gesetz von Coulomb eine dem Newtonschen Gravitationsgesetz analoge Formulierung erhalten haben, gestatten nach der neueren Auffassung eine Zurückführung auf die allgemeinere Thatsache, dass der Zwangszustand des Zwischenmediums nach Entspannung strebt. Hierdurch wird ein engerer geistiger Anschluss an das magnetische Gebiet, speziell dessen Grundthatsachen der ponderomotorischen Wirkungen erlangt, und beide zusammen werden mit den bekannteren und gleichsam mehr greifbaren Erscheinungen, welche aus mechanischen Spannungs- oder Zwangszuständen folgen, in enge Verbindung gebracht. Durch Ausmerzung der Fernwirkungstheorie sowohl auf elektrischem als magnetischem Gebiet hat die Einheitlichkeit unserer Naturauffassung in gedankenökonomischer Hinsicht ausserordentlich gewonnen. Durch die namentlich von Faraday, Maxwell und Hertz geförderte Erkenntnis, dass der Sitz der Energie im Zwischenmedium liegt, ist gleichsam eine Erklärung jener bei der Fernwirkung nur erfahrungsmässig konstatierten Thatsache der ponderomotorischen Bewegungserscheinungen möglich. Unter Hinzuziehung des in der Wärmelehre zuerst benutzten Entropiebegriffes, d. h. unter Ausdehnung desselben auf die anderen Energieformen vermag man diese in irgend einer Systemanordnung auftretenden Bewegungserscheinungen, z. B. die elektrostatischen Anziehungserscheinungen oder auch die Anziehung eines weichen Eisenstückes durch einen ungeschlossenen Magnet, etwa permanenten Stabmagnet, stets auf den einheitlichen Grund zurückzuführen, dass durch die angestrebte Neuordnung des Systems die Gesamtheit der Spannungsenergie (potentiellen Energie) des Systems, das ist sein Zwangszustand, ein tieferes Niveau anstrebt bezw. annimmt, wobei ein relatives Entspannen eintritt. Der früher auf allen diesen Gebieten benutzte Potentialbegriff, welchem ein hoher mathematischer Wert für die Fernwirkungsauffassung nicht abzusprechen ist, insofern er das zusammenfassende Moment der verschiedenen auf Fernwirkung gegründeten Erscheinungsgebiete darstellt, hat in der neueren energetischen Auffassung des Zwischenmediums einen greifbaren, weniger abstrakten Ersatz gefunden, wobei natürlich manche der früheren Potentialbetrachtungen als wertvolle Vorarbeiten einen Wert als mathematisches Hülfsmittel behalten.

Die ziemlich weitgehenden formelmässigen Analogien, welche die elektrostatischen und die magnetischen Erscheinungen aufweisen, lassen vielfach gemeinschaftliche Betrachtungsweisen zu, namentlich soweit die mathematische Behandlung der gegebenen physikalischen Grundlagen in Frage kommt.

Es wurde bereits früher (vgl. 8) darauf hingewiesen, dass dieser früh erkannte und in mancher Hinsicht zu weit getriebene Parallelismus zwischen Elektrostatik und Magnetismus der Entwickelung der heute allgemeinen Auffassung des letzteren sogar hinderlich war. Nunmehr ist aber der Umschwung in der Auffassung der magnetischen Erscheinung wohl geeignet, günstig auf die Loslösung der elektrostatischen Erscheinungen aus den sie noch gegenwärtig vielfach fesselnden Banden der älteren Fernwirkungsauffassung einzuwirken.

Die Begriffe des „Feldes", der Kraft- bezw. Induktionslinien, sowie manche andere, den Gebieten gemeinschaftliche Beziehungen der Elektrostatik und des Magnetismus dürften den meisten von dem magnetischen Erscheinungsgebiet her weit geläufiger sein, so dass alsdann vergleichende Hinweise auf die magnetischen Verhältnisse eine Beihülfe für die Fassung der elektrostatischen Erscheinungen vom neueren Standpunkt aus gewähren können (vgl. **53**). Eine für beide Gebiete geltende Bemerkung über die Auseinanderhaltung der physikalischen und mathematischen Momente möge daher auch bereits hier Platz finden. Der breite Raum, welchen in mehr theoretisch gehaltenen Werken der Physik die vom Standpunkt der Fernwirkungstheorie aus behandelten Kapitel über Magnetismus und Elektrostatik einzunehmen pflegen, lässt erkennen, dass diese beiden Gebiete sehr günstige Angriffspunkte für mathematisch-theoretische Behandlungen aller Art geboten haben. Für den nicht hinreichend Kundigen wird hierdurch vielfach die Übersicht oder die Unterscheidung erschwert, wieviel von denselben der eigentlichen Physik, wieviel mehr der Mathematik angehören. Ein näheres Zusehen lässt vielfach erkennen, dass die den Techniker in erster Linie interessierenden physikalischen Momente nur ganz verstreut, ja häufig sogar versteckt, d. h. zu wenig deutlich hervorgehoben sind, während der Hauptteil der Betrachtungen auf fast rein mathematische Exkursionen entfällt, die sich nicht selten von der praktischen und konkreten Physik immer weiter entfernen, so dass ihre Schlussergebnisse eben nur ein beschränktes theoretisches Interesse besitzen, hinsichtlich praktischer Verwertbarkeit aber oft als von recht zweifelhaftem Wert erscheinen werden. Eine deutliche Heraushebung der physikalischen Momente erscheint daher hier gerade auf diesen Gebieten geboten. In Anknüpfung an die früheren Hülfsvorstellungen soll zuerst das „Feld" mit seinem Zwangszustand im allgemeinen behandelt werden; hierauf erst sollen die mehr bedingten Erscheinungen, wie der Einfluss der das Feld bildenden Materialien, sowie die bei Beweglichkeit einzelner Teile des Feldes durch die angestrebte Zwangsminderung veranlassten Bewegungen folgen. Die Bewegungserscheinungen, welche durch die geschichtliche Entwickelung der Elektrophysik mehr als durch den heutigen Wissensstand gerechtfertigt in den Vordergrund getreten sind, bilden vielfach den Übergang zu den im nächsten Abschnitt behandelten elektrischen Ausgleicherscheinungen in Gestalt des Stromes. Bei einer aus der neueren Auffassung folgenden Stoffanordnung müssen sie sich aus diesem Grunde mit einer späteren Stelle begnügen, da sie als eine nur bedingt eintretende Folgeerscheinung des Zwanges im elektrischen Felde erscheinen. In dieser Beziehung besteht ein ähnliches Verhältnis wie beim elektrischen Strom gegenüber der Spannung (vgl. Einleitung).

Wollte man von bestimmten Grunderfahrungsthatsachen des Gebietes ausgehen, was aber bei einer zusammenhängenden Behandlung unter Vorausschickung einer geschichtlichen Entwickelung nicht erforderlich wird, so

würden ohne Rücksicht auf die oft etwas zufällige geschichtliche Reihenfolge hier die erst nachträglich als Schlussfolgerung beobachteten experimentellen Thatsachen zu wählen sein, welche im folgenden unter Elektrostriktion behandelt sind, sowie auch andere den Zwangszustand im elektrostatischen Felde direkt bestätigende Erscheinungen, wie optische Doppelbrechung.

I. Das elektrische Feld.

111. Definition und Elementenpaar des elektrischen Feldes.

Das Auftreten jedes elektrischen Spannungszustandes, gleichgiltig durch welche Ursache erzeugt oder von welchen Folgeerscheinungen (Strom) begleitet, ist so untrennbar mit dem Auftreten eines Spannungs- oder Zwangszustandes in der Umgebung verknüpft, dass, wie schon (**109**) erwähnt, das eigentliche Wesen der elektrischen Spannung hierdurch bedingt wird. Das an diesem Zwangszustand beteiligte Raumgebiet sei als elektrisches Feld bezeichnet. Da der Begriff der elektrischen Spannung strenggenommen nur einen Sinn giebt, wenn er auf zwei räumlich getrennte Punkte bezw. Flächen bezogen wird, so muss das elektrostatische Feld (vgl. **80**) stets zwischen zwei korrespondierende Flächen eingeschlossen sein. Mögen diese Endflächen, welche das elektrische Feld einschliessen und gewöhnlich Grenzflächen zwischen Leiter und Nichtleiter bilden, nun ausdrücklich beide ihren gegensätzlichen Charakter durch die Vorzeichen + und — ausgedrückt erhalten, oder möge die Gegensätzlichkeit nur stillschweigend durch Angabe der Polarität bei der hauptsächlich ins Auge gefassten Grenzfläche zum Ausdruck gelangen, nie wird das elektrische Feld nur eine einseitige Begrenzung haben (die Kraftlinie im Unendlichen enden).

Für die Behandlung bestimmter elektrostatischer Felder in ihrer Abhängigkeit von Lage und Gestaltung dieser Grenzflächen wird sowohl in qualitativer als quantitativer Hinsicht die Heranziehung einer Hülfsvorstellung Vorteile gewähren, ja ohne dieses Zwischenglied wird eine Betrachtung der unsichtbaren d. h. die Grenze der direkten Wahrnehmung unterschreitenden Vorgänge nicht durchführbar sein. Im vorliegenden Fall werden die ältere Faradaysche (dielektrische) Polarisationsvorstellung oder die Maxwellsche Verschiebungsvorstellung ebenso wie die neueren Feldvorstellungen mit den verborgenen cyklischen Bewegungen (vgl. **61** bezw. **65** bezw. **75**) verwendbar sein und zu im wesentlichen gleichen Resultaten führen, doch sollen aus den früher (**78**) angegebenen Gründen, sowie besonders hier wegen der unmittelbareren Unterstützung, welche die Verschiebungsvorstellung zu gewähren im stande ist, diese Hülfsvorstellungen (siehe **65**) benutzt werden.

Sonach wäre der Zwangs- oder Spannungszustand im elektrischen Felde mechanisch durch die Dehnung der elastischen Zwischenmembrane veranschaulicht, welche in jedem Nichtleiter die Friktionsteilchen an einer endgiltigen Fortwanderung, wie sie im Leiter möglich ist, verhindern (Fig. 8 und 9).

Bezüglich der Unterscheidung aller Materialien oder raumerfüllenden Substanzen in Leiter und Nichleiter (Isolator, Dielektrikum) sei bemerkt, dass die Auffassung hier eine typische Wandlung durchgemacht hat, wie aus der geschichtlichen Entwickelung (vgl. 5) hervorgeht, die nicht nur bei dieser Unterscheidung, sondern auch in anderen Fällen bei wichtigen und fundamentalen Unterscheidungen nachweisbar ist. Diese Wandlung, welche als die

Folge des naturgemässen Widerstreites zwischen dem menschlichen Unterscheidungs- und Einteilungsbestreben und den allen Naturerscheinungen mehr oder weniger eigenen Kontinuität angesehen werden kann, besteht in Folgendem: Im Beginn der Entwickelung eines wissenschaftlichen Zweiges werden von scharfsichtigen Forschern die stark abweichenden und für den vorläufigen Anschein durchgreifenden Unterschiede erkannt und durch die Bildung gegensätzlicher Begriffe, wie Leiter und Nichtleiter (Isolatoren), oder magnetisch und unmagnetisch, zum Ausdruck gebracht und in die Wissenschaft als fundamentale Gegenüberstellungen eingeführt. Bei der weiteren Entwickelung ergeben dann genauere kritische Untersuchungen, dass die Unterscheidung nicht scharf durchführbar, sondern dass strenggenommen nur mehr oder weniger grosse quantitative Unterschiede vorliegen, so dass die Qualitätsunterscheidung in Frage gestellt scheint. Trotz dieser Feststellung würde es jedoch voreilig und praktisch verwerflich sein, nun diese Qualitätsunterscheidung über Bord werfen zu wollen. Man wird vielmehr gut thun, sie unter stillschweigendem Vorbehalt jener Einschränkung bezw. stillschweigendem Zugeständnis, dass für ein bestimmtes Gebiet (Übergangsgebiet) eine gewisse Willkürlichkeit der Scheidegrenze besteht, beizubehalten, da der rein praktische Wert der Unterscheidung für die meisten Fälle des Gebrauches unleugbar ist und dieser Umstand ausschlaggebend wirken muss. In diesem Sinne soll auch im Folgenden die Unterscheidung in Leiter und Nichtleiter beibehalten werden.

112. Geometrische Zerlegung des Feldes in Zellen.

Unter Anknüpfung an die früheren Ausführungen (vgl. **65**), welche sich zum Teil auf das elektrische Feld und seine Eigenschaften beziehen, sollen hier noch die übrigen physikalisch wichtigen Begriffe und Formulierungen, welche mit dem Feld in Zusammenhang stehen, folgen. Hierbei soll zunächst von den leichter übersehbaren Verhältnissen, wie sie beim homogenen elektrostatischen Feld vorliegen, ausgegangen werden. Ein solches praktisch homogenes elektrostatisches Feld wird erhalten, wenn die beiden Grenzflächen, zwischen welchen die elektrische Druckdifferenz oder Spannung besteht, eine planparallele Schicht einer isolierenden (festen, flüssigen oder gasförmigen) Substanz einschliessen, die hinreichende Homogenität in allen Ebenen parallel zu den Grenzflächen besitzt. Obwohl die Grenzflächen nicht notwendig einem Leiter anzugehören brauchen, da sich auch die Oberflächen fester Dielektrika, z. B. durch Reibung in den elektrisch gespannten Zustand versetzen lassen, ein unter andern bei den Elektrisiermaschinen vorliegender Fall, so möge doch zunächst die Anordnung nach Art eines Kondensators mit zwei Metallbelegungen angenommen sein. Dies bildet für die erste Betrachtung deshalb den einfacheren Fall, weil die für die Erzeugung eines homogenen elektrostatischen Feldes zwischen allen Punkten der Grenzflächen erforderliche Gleichheit der elektrischen Druckdifferenz nur bei leitenden Grenzflächen gewährleistet oder praktisch ausreichend herstellbar ist, denn nur innerhalb zusammenhängender Leiter findet elektrostatisch eine Fortpflanzung des an einem Punkt erteilten Druckes nach allen anderen Punkten der Grenzflächen statt, ganz analog dem einer zusammenhängenden Flüssigkeitsmasse (vgl. **109**) erteilten hydraulischen Druck.

Ist Gleichheit der Druckdifferenz E zwischen allen Punkten der beiden Grenzflächen vorhanden und ebenso in jeder der senkrecht zu den Grenzflächen verlaufenden geraden Verschiebungsbahnen Gleichheit des elastischen Wider-

standes, welchen die hintereinander geschalteten Membrane (Scheidewände der Friktionsteilchen, vgl. hierzu Fig. 7 bis 9 in **65**) gegen eine Verschiebung darbieten, so wird das Gleichgewicht zwischen wirksamem Druck E (elektrischer Spannung) und Gegendruck $-E$ (Membranspannung) in allen Verschiebungsbahnen unter Verhältnissen eintreten, die in jeder Beziehung gleich sind, d. h. auch quantitativ.

Das elektrostatische Feld wird ganz wie das für viele geläufigere magnetische Kraftfeld durch Linien bezw. Flächen geometrisch abgebildet oder graphisch charakterisiert werden können, wenn man durch Richtung und Dichte der Linien, die Richtung und die Grösse der Verschiebung in den einzelnen Teilen des Feldes zum Ausdruck bringt. Als Ergänzung hierzu kann man in Übereinstimmung mit Betrachtungen aus der Mechanik noch eine zweite zu jener ersten senkrechte Hauptfortschreitungsrichtung innerhalb jedes elektrostatischen Feldes herausheben. Für die Theorie dieser Erscheinungen sind beide wegen ihrer Wichtigkeit mit besonderen Namen belegt worden. Geht man also von irgend einem Punkt der (positiven) Grenzfläche aus und schreitet kontinuierlich immer in Richtung der Verschiebung fort, so beschreibt man eine dielektrische Verschiebungslinie oder elektrostatische Induktionslinie, welche im homogenen Feld an allen Stellen mit der Richtung des Druckes (der elektrostatischen Kraftlinie) zusammenfällt und geradlinig verläuft, das ist im vorliegenden Fall senkrecht zu beiden Grenzflächen; geht man hingegen von irgend einem Punkt dieser Verschiebungslinie aus und schreitet im homogenen Feld immer senkrecht zur Richtung der unter sich parallelen Verschiebungs- bezw. Kraftlinienrichtung fort, so bewegt man sich in einer Linie gleichen Druckes oder gleicher Druckdifferenz gegenüber dem Druck an der Grenzfläche, das ist auf einer Äquipotentiallinie. Im ersteren Fall kann man beliebig viele benachbarte Verschiebungslinien sich zu einer Fläche verbunden denken, welche beim Zurückkehren zur Ausgangslinie eine in sich geschlossene röhrenförmige und beim homogenen Feld cylindrische Fläche liefert. Denkt man sich das ganze Feld in derartige Verschiebungsröhren (Induktionsröhren, Kraftröhren) aufgelöst, so sind diese gedanklichen Scheideflächen dadurch charakterisiert oder definiert, dass nur innerhalb derselben, aber nie quer durch sie hindurch eine Verschiebung stattfindet. Im zweiten Fall kann man das definierte Fortschreiten senkrecht von Verschiebungslinie zu Verschiebungslinie nicht nur nach einer Richtung, sondern nach beliebig vielen ausführen, d. h. in einer Fläche gleichen Druckes (Äquipotentialfläche); denkt man sich dies an verschiedenen Stellen der anfangs betrachteten Verschiebungslinie ausgeführt, so erhält man von der Grenzfläche ausgehend eine Schar aufeinanderfolgender, weder sich selbst noch die Grenzfläche schneidender Ebenen, welche für sich das elektrostatische Feld in schalenförmige Gebilde zerlegen. Diese Scheideebenen, welche beim homogenen Feld unter sich parallel verlaufen, sind dadurch definiert, dass in jeder dieser Ebenen zwei beliebig weit auseinanderliegende Punkte keine elektrostatische Druckdifferenz gegeneinander aufweisen, oder, was dasselbe ist, dass alle Punkte gegen die Grenzfläche dieselbe Druckdifferenz aufweisen.

Zur Charakterisierung des elektrischen Feldes wird man sich weder die Scheidewände der ersten, noch der zweiten Art beliebig geführt denken, sondern wie folgt wählen: bei den Verschiebungsröhren den Querschnitt so, dass durch jeden Querschnitt einer solchen Röhre beim Übergang

vom neutralen oder spannungslosen Zustand bis zum stationären oder elektrostatischen Gleichgewichtszustand die Verschiebungsgrösse (Elektrizitätsmenge oder nach MAXWELLs Vorstellung die Anzahl der hierbei durch einen Röhrenquerschnitt hindurchtretenden Friktionsteilchen) die Einheit beträgt; für die Flächen gleichen Druckes hingegen den Abstand auf jeder Verschiebungslinie so, dass die längs der Verschiebungslinie (der Stärke der Membranspannung als Gegenspannung proportionale) stattfindende Druckänderung, das ist die Druckdifferenz zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Flächen gleichen Druckes (Niveauflächen, Äquipotentialflächen) die Einheit beträgt. Durch diese beiden Arten von Flächen, welche sich gegenseitig schneiden, wird das ganze elektrostatische Feld in Zellen zerlegt, welche alle untereinander in der Grösse des Faktorenproduktes: Druckdifferenz $\times$ Verschiebungsgrösse, oder was dasselbe sagt: Spannungsdifferenz $E \times$ Elektrizitätsmenge Q übereinstimmen, d. h., wie im Folgenden zu zeigen, gleichen Inhalt an elektrischer Spannungsenergie besitzen.

Wegen bequemer Ausfüllung des Gesamtquerschnittes des elektr(ostat)ischen Feldes, sowie der graphischen Darstellung ist man übereingekommen, die Einheitsquerschnitte der Verschiebung quadratisch zu wählen und die Seele dieser quadratischen Verschiebungsröhren durch eine Induktionslinie (elektrische Kraftlinie) in der Mitte graphisch darzustellen. Beim homogenen Feld werden sonach würfelförmige bezw. parallelepipedische Energiezellen sich ergeben und bei graphischer Darstellung eines Querschnittes durch das elektrische Feld in Richtung der Verschiebungslinien würde das homogene Feld durch sich senkrecht schneidende in gleichen Abständen verlaufende Parallele gebildet sein. Fig. 51 würde diese Darstellung für den oben erwähnten Fall zweier planparalleler Grenzflächen (Kondensator) mit dazwischen befindlichem homogenen Dielektrikum liefern. Die obere und untere Randpartie zeigt den Übergang von dem (mittleren) homogenen Feld, welches zwischen den Flächen in genügendem Abstand vom Rande wirklich vorhanden ist, zu dem inhomogenen Feld, welches durch die abweichenden dielektrischen Widerstandsverhältnisse (der Verschiebung) in der Nähe und zu beiden Seiten des Randes veranlasst wird.

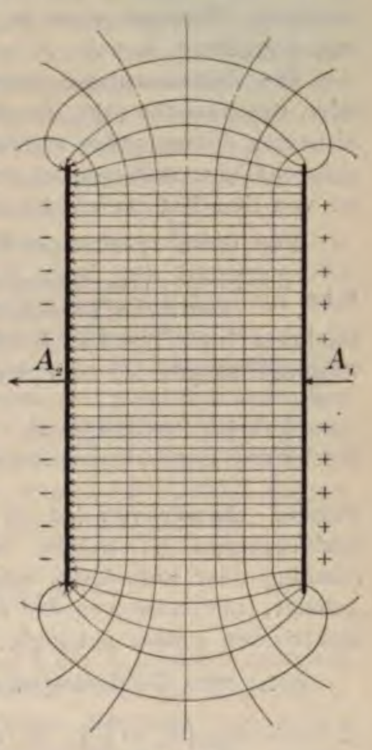


Fig. 51.

Der Übergang vom homogenen elektrischen Feld zu einem beliebigen (inhomogenen) wird unter Beibehaltung aller vorausgegangenen Überlegungen und Festsetzungen sich nur durch das Aufgeben der einfachen (parallelepipedischen) geometrischen Gebilde vollziehen. Wie die Randpartien der Fig. 51, sowie der in **115** und Fig. 55 behandelte Fall zeigen, wird an Stelle des geradlinigen Verlaufs der Verschiebungsbahnen oder -linien der krummlinige treten und damit in Zusammenhang an Stelle der cylindrischen Ver-

schiebungsröhren (Induktionsröhren, Kraftröhren) die konischen (im weiteren Sinne). Ebenso werden die Flächen gleichen Druckes nicht eben und parallel, sondern gekrümmt und gegeneinander geneigt — natürlich ohne zum gegenseitigen Schneiden zu kommen — verlaufen, wodurch die Form der Energiezellen des elektrischen Feldes gleichfalls entsprechend beeinflusst wird. Für ein einheitliches homogenes Dielektrikum ist bei gegebener Form und Lage der Grenzflächen die Bestimmung des Verlaufes dieser Flächen und Linien in den einzelnen Fällen eine rein geometrische Aufgabe, die natürlich die grösste Mannigfaltigkeit in den mathematischen Hülfsmitteln für die teils exakt, teils nur angenähert mögliche Lösung erfordert, jedoch mit Ausnahme der unten (**115**) folgenden Fälle den Rahmen dieses Buches überschreitet. (Weiteres siehe in Werken über theoretische Physik wie Mascart und Joubert u. s. w.)

Der Zusammenhang zwischen Druckgefälle und Verschiebungsintensität oder, was dasselbe sagt, die absolute Grösse jener Zellen nach Festsetzung einer absoluten Grösse nebst zugehörigem Massstab für die Einheitsverschiebungsgrösse (Elektrizitätsmenge) und für die elektrische Druckdifferenz (Spannung) ist von den Materialien des elektrischen Feldes abhängig.

Für diese spezifische Materialgrösse, welche Faraday $\left(\text{in der Form } \varkappa = \frac{\text{dielektrische Verschiebungsintensität}}{\text{elektrisches Druckgefälle}}\right)$ als spezifische Induktionskapazität bezeichnete (vgl. Exp. Res. I, 1252), wird heute besser die Bezeichnung Dielektrizitätskonstante ($\varkappa$) oder deren reziproker Wert

$$\frac{\text{elektrisches Druckgefälle } E_1}{\text{dielektrische Verschiebungsgrösse } \lambda_1} \text{ als spezifischer dielektrischer Widerstand } \left(\sigma = \frac{1}{\varkappa}\right)$$

benutzt. Ausser von ihr ist die Summenverschiebung oder gesamte Elektrizitätsmenge Q, welche bei diesem elektrostatischen Ausgleichvorgang (Ladung oder Entladung) zur Verschiebung durch jeden Kreislaufquerschnitt gelangt, nur noch von der Ladespannung E und von den Dimensionen des elektrischen Feldes abhängig.

113. *Homogene Felder und Formulierung des Kapazitätswertes.*

Setzt man die Ladespannung E mit der Gesamtladung $Q = \frac{N_{el}}{4\pi}$ (vgl. **68**) in Beziehung $\left(N_{el} = \frac{E}{S_d}\right)$, so erhält man in dieser Spezialisierung des allgemeinen Ausgleichgesetzes als drittes bedingendes Glied einen Ausdruck der analog dem ohmischen Widerstande, sowie auch dem magnetischen Ausgleichwiderstand formuliert ist. Dieser elektrische oder auch dielektrische Spannwiderstand (S_d), welcher unter die Klasse der Elastizitätswiderstände gehört und nach der Formel

$$S_d = \frac{l}{q \cdot \varkappa} = \frac{l \cdot \sigma}{q}$$

gebildet wird (vgl. **65**), würde einerseits von der Grösse, Gestalt und Lage der Grenzflächen, zwischen denen die Ladespannung E wirkt, andererseits von Art, Lage und Dimensionen der Materialien in der Umgebung der Grenzflächen abhängen. Denkt man sich, wie oben (**112**) angegeben, das ganze elektrische Feld in Einheitsröhren (Verschiebungs- oder Kraftröhren) aufgelöst, so sind dieselben bezüglich des Widerstandes S_d alle parallel geschaltet, so dass, wenn ihre Anzahl q beträgt, der Widerstand

$(S_d)_1$ der Einheitsröhre durch $(S_d)_1 = l \cdot \sigma$ gegeben ist. Für den einfachen Fall des homogenen elektrischen Feldes mit cylindrischen Verschiebungs- oder Kraftröhren, d. h. konstantem Röhrenquerschnitt wird $(S_d)_1$ also ausser vom Material nur durch den Plattenabstand l bedingt.

Im allgemeinen wird S_d den Charakter eines Ausbreitungswiderstandes im unbegrenzten Medium besitzen, und die Eigenschaften des elektrostatischen Feldes hinsichtlich Verlauf und Zahl der Kraftlinien (Induktionslinien) und Verlauf der Niveauflächen werden durch die allen derartigen Ausgleichvorgängen — seien sie mechanischer, thermischer, elektrischer oder magnetischer Natur — eigentümliche Bedingung festgelegt sein, dass für ein gegebenes E der Ausgleich (hier Q bezw. N_{el}) ein relatives Maximum wird, also S_d und damit auch der dielektrische Zwangszustand im Feld ein Minimum. Dieses Maximum- bezw. Minimumbestreben liefert nun für alle komplizierteren Verhältnisse die Erklärung der Erscheinungen, sowohl was die „ponderomotorischen Wirkungen", d. h. die mechanischen Bewegungen von Körpern im elektrischen Feld anlangt, als auch bei mechanisch feststehenden Kombinationen die Verteilung der dielektrischen Verschiebungslinien (Induktionslinien) in Verbindung mit den Niveauflächen.

Bei Behandlung der praktisch wichtigeren Fälle, welche durch Variation der den Wert von S_d bedingenden Momente (vgl. oben) sich ergeben, geht man am besten wieder vom einfachsten Fall des homogenen Feldes aus und betrachtet die als eine Art Störung hinzukommenden Komplizierungen, indem man die Einzelmomente nacheinander variiert. Ist der Abstand zwischen den parallelen und nach Art von Kondensatorbelegungen sich gegenüberstehenden Grenzflächen klein und von einem einheitlichen Dielektrikum (fest, flüssig oder gasförmig) erfüllt, so kann von den Störungen, welche an den Randpartien auftreten, praktisch abgesehen werden. In diesem Falle ist der elektrostatische Ausgleich in Gestalt aller elektrischen Kraftlinien (vgl. **68**),

$$N_{el} = 4\pi\, Q = \frac{E}{S_d} = 4\pi \cdot E \cdot C = E \cdot \frac{q \cdot \varkappa}{l}$$

aus den Dimensionen (Querschnitt q und Abstand l der beiden Grenzflächen oder Belegungen) verhältnismässig leicht berechenbar, wenn die Spannung E, mit welcher Q erfahrungsgemäss direkt proportional zunimmt (vgl. hierzu jedoch die bezüglich der Ladezeit bestehende Beschränkung in **124**), ebenso wie die Dielektrizitätskonstante $\varkappa$ bekannt ist. Da $\varkappa$ für Luft praktisch gleich der Einheit, so folgt für die Kapazität C eines solchen Luftkondensators — die Benutzung des dem dielektrischen Verschiebungs*widerstand* S_d reziproken Wertes, d. i. des Verschiebungs*vermögens* oder der Kapazität C ist praktisch in der Elektrostatik gebräuchlicher —

$$C = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{q}{l},$$

sowie nach *völligem* Ersatz der Luft durch ein anderes Dielektrikum

$$C = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{q \cdot \varkappa}{l},$$

d. h. bei gleicher Spannung E die Grösse Q, die bequem messbar, $\varkappa$mal grösser, ein Umstand der eine wertvolle Methode der Bestimmung von $\varkappa$ ab-

schiebungsröhren (Induktionsröhren, Kraftröhren) die konischen (im weiteren Sinne). Ebenso werden die Flächen gleichen Druckes nicht eben und parallel, sondern gekrümmt und gegeneinander geneigt — natürlich ohne zum gegenseitigen Schneiden zu kommen — verlaufen, wodurch die Form der Energiezellen des elektrischen Feldes gleichfalls entsprechend beeinflusst wird. Für ein einheitliches homogenes Dielektrikum ist bei gegebener Form und Lage der Grenzflächen die Bestimmung des Verlaufes dieser Flächen und Linien in den einzelnen Fällen eine rein geometrische Aufgabe, die natürlich die grösste Mannigfaltigkeit in den mathematischen Hülfsmitteln für die teils exakt, teils nur angenähert mögliche Lösung erfordert, jedoch mit Ausnahme der unten (**115**) folgenden Fälle den Rahmen dieses Buches überschreitet. (Weiteres siehe in Werken über theoretische Physik wie Mascart und Joubert u. s. w.)

Der Zusammenhang zwischen Druckgefälle und Verschiebungsintensität oder, was dasselbe sagt, die absolute Grösse jener Zellen nach Festsetzung einer absoluten Grösse nebst zugehörigem Massstab für die Einheitsverschiebungsgrösse (Elektrizitätsmenge) und für die elektrische Druckdifferenz (Spannung) ist von den Materialien des elektrischen Feldes abhängig.

Für diese spezifische Materialgrösse, welche Faraday $\left(\text{in der Form } \varkappa = \frac{\text{dielektrische Verschiebungsintensität}}{\text{elektrisches Druckgefälle}}\right)$ als spezifische Induktionskapazität bezeichnete (vgl. Exp. Res. I, 1252), wird heute besser die Bezeichnung Dielektrizitätskonstante ($\varkappa$) oder deren reziproker Wert

$$\frac{\text{elektrisches Druckgefälle } E_1}{\text{dielektrische Verschiebungsgrösse } \lambda_1} \text{ als spezifischer dielektrischer Widerstand } \left(\sigma = \frac{1}{\varkappa}\right)$$

benutzt. Ausser von ihr ist die Summenverschiebung oder gesamte Elektrizitätsmenge Q, welche bei diesem elektrostatischen Ausgleichvorgang (Ladung oder Entladung) zur Verschiebung durch jeden Kreislaufquerschnitt gelangt, nur noch von der Ladespannung E und von den Dimensionen des elektrischen Feldes abhängig.

113. Homogene Felder und Formulierung des Kapazitätswertes.

Setzt man die Ladespannung E mit der Gesamtladung $Q = \frac{N_{el}}{4\pi}$ (vgl. **68**) in Beziehung $\left(N_{el} = \frac{E}{S_d}\right)$, so erhält man in dieser Spezialisierung des allgemeinen Ausgleichgesetzes als drittes bedingendes Glied einen Ausdruck der analog dem ohmischen Widerstande, sowie auch dem magnetischen Ausgleichwiderstand formuliert ist. Dieser elektrische oder auch dielektrische Spannwiderstand (S_d), welcher unter die Klasse der Elastizitätswiderstände gehört und nach der Formel

$$S_d = \frac{l}{q \cdot \varkappa} = \frac{l \cdot \sigma}{q}$$

gebildet wird (vgl. **65**), würde einerseits von der Grösse, Gestalt und Lage der Grenzflächen, zwischen denen die Ladespannung E wirkt, andererseits von Art, Lage und Dimensionen der Materialien in der Umgebung der Grenzflächen abhängen. Denkt man sich, wie oben (**112**) angegeben, das ganze elektrische Feld in Einheitsröhren (Verschiebungs- oder Kraftröhren) aufgelöst, so sind dieselben bezüglich des Widerstandes S_d alle parallel geschaltet, so dass, wenn ihre Anzahl q beträgt, der Widerstand

$(S_d)_1$ der Einheitsröhre durch $(S_d)_1 = l \cdot \sigma$ gegeben ist. Für den einfachen Fall des homogenen elektrischen Feldes mit cylindrischen Verschiebungs- oder Kraftröhren, d. h. konstantem Röhrenquerschnitt wird $(S_d)_1$ also ausser vom Material nur durch den Plattenabstand l bedingt.

Im allgemeinen wird S_d den Charakter eines Ausbreitungswiderstandes im unbegrenzten Medium besitzen, und die Eigenschaften des elektrostatischen Feldes hinsichtlich Verlauf und Zahl der Kraftlinien (Induktionslinien) und Verlauf der Niveauflächen werden durch die allen derartigen Ausgleichvorgängen — seien sie mechanischer, thermischer, elektrischer oder magnetischer Natur — eigentümliche Bedingung festgelegt sein, dass für ein gegebenes E der Ausgleich (hier Q bezw. N_{el}) ein relatives Maximum wird, also S_d und damit auch der dielektrische Zwangszustand im Feld ein Minimum. Dieses Maximum- bezw. Minimumbestreben liefert nun für alle komplizierteren Verhältnisse die Erklärung der Erscheinungen, sowohl was die „ponderomotorischen Wirkungen", d. h. die mechanischen Bewegungen von Körpern im elektrischen Feld anlangt, als auch bei mechanisch feststehenden Kombinationen die Verteilung der dielektrischen Verschiebungslinien (Induktionslinien) in Verbindung mit den Niveauflächen.

Bei Behandlung der praktisch wichtigeren Fälle, welche durch Variation der den Wert von S_d bedingenden Momente (vgl. oben) sich ergeben, geht man am besten wieder vom einfachsten Fall des homogenen Feldes aus und betrachtet die als eine Art Störung hinzukommenden Komplizierungen, indem man die Einzelmomente nacheinander variiert. Ist der Abstand zwischen den parallelen und nach Art von Kondensatorbelegungen sich gegenüberstehenden Grenzflächen klein und von einem einheitlichen Dielektrikum (fest, flüssig oder gasförmig) erfüllt, so kann von den Störungen, welche an den Randpartien auftreten, praktisch abgesehen werden. In diesem Falle ist der elektrostatische Ausgleich in Gestalt aller elektrischen Kraftlinien (vgl. **68**),

$$N_{el} = 4\pi\, Q = \frac{E}{S_d} = 4\pi \cdot E \cdot C = E \cdot \frac{q \cdot \varkappa}{l}$$

aus den Dimensionen (Querschnitt q und Abstand l der beiden Grenzflächen oder Belegungen) verhältnismässig leicht berechenbar, wenn die Spannung E, mit welcher Q erfahrungsgemäss direkt proportional zunimmt (vgl. hierzu jedoch die bezüglich der Ladezeit bestehende Beschränkung in **124**), ebenso wie die Dielektrizitätskonstante $\varkappa$ bekannt ist. Da $\varkappa$ für Luft praktisch gleich der Einheit, so folgt für die Kapazität C eines solchen Luftkondensators — die Benutzung des dem dielektrischen Verschiebungs w i d e r s t a n d S_d reziproken Wertes, d. i. des Verschiebungs v e r m ö g e n s oder der Kapazität C ist praktisch in der Elektrostatik gebräuchlicher —

$$C = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{q}{l},$$

sowie nach v ö l l i g e m Ersatz der Luft durch ein anderes Dielektrikum

$$C = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{q \cdot \varkappa}{l},$$

d. h. bei gleicher Spannung E die Grösse Q, die bequem messbar, $\varkappa$mal grösser, ein Umstand der eine wertvolle Methode der Bestimmung von $\varkappa$ ab-

giebt (vgl. **119**). Auch die Dichte (Intensität) des elektrischen Feldes in Verschiebungslinien (Induktionslinien oder elektrischen Kraftlinien) auf die Querschnittseinheit z. B. cm^2 gemessen ergiebt sich bei der hier noch vorliegenden Homogenität sehr einfach durch Division mit q, so dass diese der magnetischen Feldintensität B analoge elektrostatische Grösse (vgl. auch **134**)

$$B_{el} = \frac{N_{el}}{q} = 4\pi \cdot \lambda = 4\pi \cdot \frac{E \cdot C}{q} = \frac{E \cdot \varkappa}{l}$$

oder für Luft $\frac{E}{l}$. Hierbei ergiebt sich C und dementsprechend auch B_{el} in elektrostatischen CGS-Einheiten, wenn E in Volt $\cdot \frac{10^8}{3 \cdot 10^{10}} = \frac{\text{Volt}}{300}$ (vgl. Masssystem, Bd. II), q in cm^2 und l in cm gemessen wird. Die praktisch übliche Einheit des Mikrofarad im EMM ergiebt sich durch Division mit 900000. So erhielte man z. B. für zwei Platten von je 1 m^2 = 10000 cm^2 Grösse im Abstand von 8 mm in Luft die Kapazität derselben zu

$$C = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{10^4}{0{\cdot}8} = 1000 \text{ CGS-Einheiten (elektrostatisch)} = \frac{1000}{900000} = \frac{1}{900} \text{ Mf.}$$

Geladen mit 500 Volt wäre die elektrische Felddichte

$$B_{el} = \frac{500}{300 \,.\, 0{\cdot}8} = 2{\cdot}08 \text{ CGS-Einheiten (elektrostatisch).}$$

Über die Grösse der mechanischen Anziehung der beiden Platten siehe **136**.

114. **Einfluss der Streufelder auf den Kapazitätswert.**

Den Einfluss, welchen die Variation der Lage der beiden Grenzflächen auf das Feld besitzt, wird man am besten für sich untersuchen, indem man bei konstant gedachter Spannungsdifferenz E sich beide in einem homogenen und zunächst unbegrenzt gedachten Dielektrikum (z. B. Luft mit $\varkappa = 1$) befindlich vorstellt. Wiederum möge von dem Spezialfall, dass die beiden als Metallplatten gedachten Grenzflächen in kleinem Abstand l parallel zu einander verlaufen, ausgegangen werden. Ist q sehr gross gegenüber l, so werden nur die Randpartien des elektrischen Feldes (vgl. Fig. 51) eine Korrektion des zu

$$C = \left(\frac{\varkappa}{4\pi}\right) \cdot \frac{q}{l}$$

sich ergebenden Wertes der Kapazität des Systems veranlassen, und neben dem homogenen Feld zwischen den Platten mit der Dichte

$$B_{el} = \varkappa \cdot \frac{E}{l}$$

noch eine Art elektrisches Streufeld schaffen. Das letztere (vgl. hierzu Fig. 51) wird namentlich auch durch den Umstand bedingt, dass alle Oberflächenteile der Belegungen unter Spannung (E) stehen. Daraus folgt, dass bei der Verschiebungsfähigkeit des ausserhalb unbegrenzt vorhandenen Dielektrikums die Verschiebung streng genommen nicht nur auf den Raum zwischen den Platten beschränkt sein kann, sondern dass auch u. a. von Rückseite zu Rückseite Verschiebungsröhren bezw. elektrostatische Drucklinien (Kraftlinien bezw. Induktionslinien) verlaufen. Mit anderen Worten,

wenn man auch bei h i n r e i c h e n d dünnen Belegungen von dem zusätzlichen Feld infolge der Verschiebung zwischen deren Endkanten absehen kann, so wird doch stets eine Vergrösserung gegenüber dem obigen Rechnungswert der Kapazität durch die z u s ä t z l i c h e Kapazität der Rückseiten vorliegen. Ist l sehr klein, d. h. der dielektrische Widerstand (S_d) auf dem H a u p t ausgleichwege sehr klein, so wird die Korrektion klein ausfallen wegen des verhältnismässig weiten Weges der die Rückseiten verbindenden Verschiebungsröhren, also des grossen Wertes von l und damit des $(S_d)_1$ jeder dieser N e b e n ausgleichwege; sie wird jedoch verhältnismässig sehr rasch mit wachsendem Wert von l zunehmen und wird bei grösseren Abständen durchaus nicht zu vernachlässigen sein. Gleichzeitig wird mit wachsendem Abstand, also zunehmendem l, der Bereich des homogenen Feldes mit geradlinigem Verlauf der Verschiebungsbahnen (Kraftlinien) sich auf einen immer kleineren Teil der Plattenmitte beschränken, während die mehr nach dem Rande liegenden unter dem dielektrisch leitenden Einfluss der Umgebung eine nach der Mitte von l zu wachsende Erweiterung des Röhrenquerschnittes (q) erfahren und dadurch eine gegen die Mittellinie wachsende konkave Krümmung annehmen. Bei stetig wachsendem Abstand wird die Umgestaltung des Feldes sich immer mehr den in Fig. 10 in **65** dargestellten Verhältnissen nähern und das zusätzliche Feld der einander abgewandten Seiten der Belegungen wird dem Innenfeld gegenüber immer mehr wachsen.

Die genaue rechnerische Behandlung d. h. die Formulierung des Korrektionsgliedes ist bisher nur in ganz vereinzelten Fällen gelungen. So hat z. B. KIRCHHOFF (Ges. Abh. S. 101) den genauen Kapazitätswert C für zwei kreisförmige Platten vom Radius R und dem Abstand $l = 2a$ bei der Plattendicke b berechnet zu

$$C = \frac{1}{4\pi}\left[\frac{\pi \cdot R^2}{2a} + R\left(2 + \log\frac{4(2a+b)R}{\varepsilon \cdot a^2} + \frac{b}{2a}\log\frac{2a+b}{b}\right)\right].$$

Ein Vergleich mit der Formel für die erste Annäherung

$$C = \frac{1}{4\pi}\cdot\frac{q}{l} = \frac{1}{4\pi}\cdot\frac{\pi R^2}{2a}$$

liefert die absolute und relative Grösse des Korrektionsgliedes abhängig von den Dimensionen, wobei ε die Basis der nat. Log. bezeichnet. Weitere Fälle hat MAXWELL (Bd. I, 293—330) formuliert.

Diese Verhältnisse sind, wie schon in **68** bemerkt, in analoger Weise beim elektrodynamischen Ausgleich vorhanden, wenn man an Stelle der Verschiebungsbahnen die Strömungsbahnen, bezw. an Stelle der elektrostatischen Kraftlinien (Induktionslinien) die Strömungslinien setzt, an Stelle der Belegungen die sogenannten Elektroden oder Eintauchplatten von merklich besserer Leitungsfähigkeit als das umgebende, n i c h t isolierende Medium (meist Flüssigkeit, heisses oder verdünntes Gas, jedoch auch feste Körper wie Erdreich und dergleichen), an Stelle des dielektrischen Widerstandes S_d bezw. $\varkappa$ den ohmischen Leitungswiderstand R bezw. Leitfähigkeit $k \cdot 4\pi$ an Stelle der Felddichte die Stromdichte u. s. f. einsetzt. Bei dem magnetischen Ausgleich liegen jedoch die Verhältnisse wegen der fehlenden Rückseiten und deren Ersatz durch „streuende“ Seitenflächen etwas anders, wenn auch noch viele Analogiepunkte bestehen bleiben.

Als Folge der Einverleibung immer grösserer angrenzender Raumteile in das elektrische Feld durch praktisch merkbare Hinzuziehung ihres dielektrischen Verschiebungsvermögens ergiebt sich:

1) die Felddichte nimmt von den Grenzflächen stetig ab bis nach der Ebene des grössten an der Verschiebung beteiligten Querschnittes im Dielektrikum (vgl. hierzu die graphische Darstellung des Feldes in Fig. 10 und 51), und besitzt an dem Fusspunkt jeder dielektrischen Verschiebungsröhre einen Wert, der umgekehrt proportional mit dem dielektrischen Widerstand $(S_d)_1$ der zugehörigen Verschiebungsröhre (bis zum korrespondierenden Fusspunkt auf der anderen Grenzfläche) sich ändert;

2) der dielektrische Widerstand S_d der als elektrisches Feld bezeichneten Ausgleichbahn nimmt langsamer ab als die Entfernung l zwischen den Belegungen (Grenzflächen) zunimmt und nähert sich einem oberen Grenzwert. Dieser Grenzwert für beliebige Steigerung von l oberhalb eines gegenüber q grossen Wertes setzt sich aus der Summe der beiden Ausbreitungswiderstände zusammen, welche im unbegrenzten Medium praktisch nur von der Ausbreitungsoberfläche abhängen. Bei ebenen Platten (Belegungen, Elektroden) ist dies die ganze Oberfläche, d. h. beide Seiten, bei gekrümmten ist es die auf dem kürzesten Wege geschlossen gedachte konvexe Oberfläche. Dies findet seine Erklärung in dem Umstand, dass der Widerstand $(S_d)_1$ jeder einzelnen Verschiebungsröhre, welcher proportional der Länge l von Fusspunkt zu Fusspunkt und umgekehrt proportional dem mittleren Röhrenquerschnitt $(q)_m$ ist, konstant wird, wenn $(q)_m$ anfängt proportional mit l zuzunehmen, d. h. $\frac{l}{(q)_m}$ konstant wird. Das Umgekehrte gilt natürlich von der Kapazität $C = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{1}{S_d}$ ESE (elektrostatische Einheiten), welche langsamer als l abnimmt und sich einem unteren Grenzwert nähert.

Hiernach wird die wesentliche Gestaltung des Feldes auch für die Fälle zu übersehen sein, dass die ebenen Grenzflächen oder plattenförmigen Belegungen nicht parallel, sondern geneigt zu einander stehen, wenn man stets den Umstand berücksichtigt, dass die Felddichten sich umgekehrt wie die Verschiebungsröhrenlängen verhalten (vgl. hierzu auch die magnetischen Verhältnisse in H. I, 2) und der gesamte Kapazitätswert auch durch die abgewandten Belegungsseiten mitbedingt wird. Der Einfluss dieser rückseitigen Kapazität wird mit zunehmender Neigung der ebenen Belegungen offenbar zunehmen und für den Neigungswinkel 180° (Platten in derselben Ebene) werden endlich die Kapazitäten beider Seiten gleichwertig. Dieselben Überlegungen gestatten auch bei nicht ebenen, sondern beliebig gekrümmten Grenzflächen, vorläufig noch im homogenen, d. h. durch andere Leiter als ungestört angenommenen Dielektrikum, die ungefähre Feldverteilung abzuleiten, jedoch kann eine genauere quantitative Ermittelung natürlich nur mit Hülfe der — allerdings nur auf einige regelmässige Formen beschränkten — Rechnung erfolgen.

115. Berechnung von Kapazitätswerten und Beziehung zu anderen Leitungskoeffizienten.

Die rechnerische Ermittelung von Kapazitätswerten wird im allgemeinen den Gang einhalten können, dass zunächst für ein Raumelement der Dielektrikumsschicht zwischen den Belegungen der dielektrische Verschiebungswiderstand

$$S_d' = \frac{l}{q \cdot \varkappa}$$

formuliert und unter Einsetzung dieses Elementarwiderstandes als Differential die einfache oder auch mehrfache Integrierung zwischen den gewünschten Grenzen ausgeführt wird. Als einfaches, aber für die Praxis wichtiges Beispiel sei die Kapazität eines konzentrischen Kabels gewählt, oder geometrisch mit Rücksicht auf die Dielektrikumsgrenze gesprochen, die Kapazität zweier konzentrischer Cylinder.

Stellt Fig. 52 den Querschnitt durch ein solches Kabel dar, bei welchem ϱ_1 den äusseren Radius des inneren Leiters, ϱ_2 den inneren Radius des äusseren Leiters bezeichnet, so ist für eine konzentrische Dielektrikumsschicht von der Dicke $d\varrho$ der dielektrische Verschiebungswiderstand nach der obigen Formel

$$S_d' = \frac{l}{q \cdot \varkappa} = \frac{d\varrho}{2\pi\varrho \cdot l \cdot \varkappa},$$

Fig. 52.

wenn l die Länge des Kabelstückes ist in gleichen Einheiten wie ϱ gemessen. Der gesamte dielektrische Verschiebungswiderstand der Kabelisolation wird also

$$S_d = \int_{\varrho_1}^{\varrho_2} \frac{d\varrho}{2\pi\varrho \cdot l \cdot \varkappa} = \frac{1}{2\pi \cdot l \cdot \varkappa} \cdot \left[ln \frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right]$$

und die Kapazität des Kabels

$$C = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{1}{S_d} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{2\pi l \cdot \varkappa}{\left(ln \frac{\varrho_2}{\varrho_1}\right)} = \frac{l \cdot \varkappa}{2\, ln \frac{\varrho_2}{\varrho_1}} \text{ ESE},$$

wenn l in cm gemessen und $\varkappa$ auf Luft als Einheit bezogen wird. Beim Übergang vom Cylinder auf die Kugel wäre in der vorstehenden Formel für q an Stelle von $2\pi\varrho \cdot l$ nur $4\pi\varrho^2$ einzusetzen, woraus sich für zwei konzentrische Kugeln ergiebt

$$S_d = \int_{\varrho_1}^{\varrho_2} \frac{d\varrho}{4\pi\varrho^2 \cdot \varkappa} = \frac{1}{4\pi\varkappa} \cdot \left(\frac{1}{\varrho_1} - \frac{1}{\varrho_2}\right),$$

also

$$C = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{1}{S_d} = \frac{1}{4\pi} \cdot 4\pi\varkappa \left(\frac{\varrho_1 \cdot \varrho_2}{\varrho_2 - \varrho_1}\right) = \varkappa \left(\frac{\varrho_1 \varrho_2}{\varrho_2 - \varrho_1}\right) \text{ ESE}.$$

Wird ϱ_2 sehr gross gegen ϱ_1, d. h. rückt die zweite Belegung, welche aber **stets** vorhanden ist, in sehr grosse Entfernung von der Kugel mit dem Radius ϱ_1, so vereinfacht sich der Kapazitätswert für letztere in

$C = \varrho_1 \cdot \varkappa$, und für Luft als Dielektrikum, d. h. $\varkappa = 1$ in $C = \varrho_1$.

Die Verkleinerung des Ausbreitungswiderstandes S_d mit wachsendem Kugelradius gilt aber nur für hinreichend grossen Abstand aller mit der Erde leitend verbundenen Gegenstände, d. h. nur in diesem Fall ist

die Kapazität einer Kugel (zu ergänzen gegen Erde als zweite Belegung) durch den Radius gegeben.

Die wissenschaftlich übliche Definition: Kapazität eines Leiters ist die Ladung, die man ihm mitteilen muss, um ihn auf das Potential (Spannung gegen Erde) Eins zu bringen, wenn alle ihn umgebenden Leiter mit der Erde leitend verbunden sind, gewinnt durch Benutzung der Vorstellung des dielektrischen Spannwiderstandes bezw. der dielektrischen Verschiebung durch den vollen Querschnitt jeder geschlossenen Niveaufläche entschieden an Greifbarkeit. Die Kapazitätswerte von den praktisch wichtigeren Leiteranordnungen in ESE, wie sie sich in einigen Fällen durch die Anwendung der höheren Mathematik auf die physikalische Grundbeziehung

$$S_d' = \frac{l'}{q' \cdot \varkappa} \text{ in Verbindung mit der Definition } \frac{4\pi}{C} = S_d = \Sigma S_d'$$

ableiten lassen, erklären bezw. behalten sich auch dementsprechend besser als reziproke dielektrische Ausbreitungswiderstände.

Der oben abgeleitete Wert für zwei konzentrische Cylinder

$$C = \frac{\varkappa \cdot l}{2\, ln \frac{\varrho_2}{\varrho_1}} \text{ ESE}$$

geht so bei gegebenem ϱ_1 aber wachsendem ϱ_2 und Abrollung des aufgeschnitten gedachten äusseren Cylinders in eine Ebene in den dielektrischen Ausbreitungswiderstand

$$S_d = \frac{1}{2\pi\, l \cdot \varkappa} \left(ln \frac{2\, h}{\varrho_1} \right)$$

über, wenn h = Abstand zwischen Cylinder und Ebene, woraus als Kapazität für einen in der Höhe h über der Erde gespannten Draht vom Radius ϱ_1 folgt

$$C = \frac{\varkappa \cdot l}{2\, ln \frac{2\, h}{\varrho_1}} \text{ ESE.}$$

Betrachtet man die leitend gedachte Ebene als Spiegelfläche, so würde ein zweiter Draht, an der Stelle des Spiegelbildes des ersten Drahtes geführt, bei gleichem Durchmesser wie ϱ_1 auch den gleichen dielektrischen Ausbreitungswiderstand gegenüber der Spiegelebene besitzen. Diese beiden Ausbreitungswiderstände sind hintereinander geschaltet, wenn es sich um den Übergang von dem einen Draht (ϱ') zu dem zweiten Paralleldraht (ϱ'') handelt, so dass bei Fortfall der Symmetrieebene (vgl. Fig. 10 in **65**) der dielektrische Ausbreitungswiderstand zwischen den beiden Drähten den Wert annimmt

$$S_d = 2 \cdot \frac{1}{2\pi\, l \cdot \varkappa} \left(ln \frac{2\, h}{\varrho} \right),$$

also die Kapazität

$$C = \frac{\varkappa \cdot l}{4\, ln \left(\frac{d}{\varrho} \right)} \text{ ESE,}$$

wenn man $2\, h = d$, den Abstand der Drahtmittel, einführt.

Dieser Wert gilt aber nur genügend genau für hinreichende Grösse von d gegenüber ϱ. Für $\frac{d}{\varrho} < 20$ muss mit abnehmendem Verhältnis ein wachsender Korrektionsfaktor für C hinzugefügt werden, weil der dielektrische Ausbreitungswiderstand kleiner wird als der obige, eigentlich für sehr grossen Abstand geltende Grenzwert. Dieser Korrektionsfaktor hat nach der unten folgenden exakten Formulierung von STEINMETZ z. B. für $\frac{d}{\varrho} = 10$ noch den kleinen Wert 1·005, hingegen für $\frac{d}{\varrho} = 5$ bereits 1·026, d. h. 2·6 %, Werte die praktisch namentlich für verseilte Hochspannungskabel in Betracht kommen können.

Die wechselseitige Übertragbarkeit der bekannten elektrostatischen Kapazitätswerte auf OHMsche Ausbreitungswiderstände von Elektroden, Erdplatten und dergleichen, sowie auch auf magnetische Feldbildung (Selbstinduktionskoeffizienten) wurde bereits früher (**68**) erwähnt.

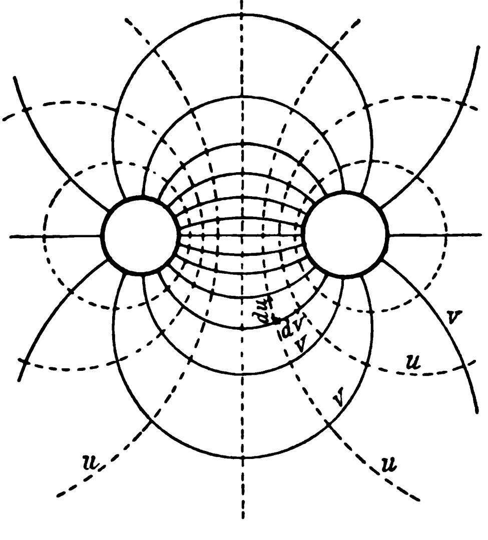


Fig. 53.

Für den praktisch besonders wichtigen Fall paralleler Leiter wurden die elektromagnetischen Konstanten auf Grund der analogen Widerstandsformulierung bei allen drei fundamentalen Ausgleichgesetzen — das ist dem dielektrischen, elektrischen und magnetischen (vgl. **65** und **68**) — wohl zuerst von STEINMETZ (vgl. 1893 ETZ, 476) abgeleitet, dessen Ausführungen wegen ihrer allgemeinen Bedeutung der Hauptsache nach hier im Wortlaut folgen mögen, jedoch unter Weglassung der rein mathematischen Transformationsbetrachtungen, welche a. a. O. nachzusehen sind:

Bekanntlich sind die Stromlinien und Niveauflächen einer zwischen zwei Flächen übertretenden nicht komprimierbaren Flüssigkeit identisch 1) mit den Stromlinien und Potentialflächen eines zwischen zwei Leitern übertretenden elektrischen Stromes, 2) mit den Äquipotentialen und Kraftlinien des durch einen in den beiden Flächen kreisenden elektrischen Strom erzeugten magnetischen Kreislaufes und 3) mit den elektrostatischen Kraftlinien und Äquipotentialflächen, und die Lösung obengenannten Problems der Hydrodynamik liefert daher gleichzeitig den Wert des elektrischen Leitungswiderstandes zwischen parallelen Leitern, und den Selbstinduktionskoeffizienten und die Kapazität paralleler Leiter.

Im Folgenden sollen die beiden für die Elektrotechnik wichtigsten Fälle betrachtet werden: 1) Kreiscylinder und parallele Ebene — d. h. Leitungsdraht und Erdboden als Rückleitung; 2) zwei parallel verlaufende exzentrische Kreiscylinder — d. h. Leitung und Rückleitung eines elektrischen Stromkreises.

Zwischen parallel verlaufenden Flächen ist die — hydrodynamische, thermische, elektrische, magnetische u. s. w. — Strömung identisch in allen die Flächen senkrecht durchschneidenden Ebenen. In jeder derartigen Schnittebene ergiebt sich sonach ein System von Niveaukurven u (in Fig. 53 strichliert), zu denen die Schnittkurven der Grenzflächen als Grenzwerte gehören, und ein System die Niveauflächen u senkrecht durchsetzender Stromkurven v, die in den Grenzkurven beginnen und enden. Sind nun

du und dv die Kurvenelemente der Kurvensysteme u und v im Punkte (uv), so ist in diesem Punkte der Widerstand (elektrisch, magnetisch, dielektrisch) u. s. w. bestimmt durch

$$c \cdot \frac{du}{dv} \qquad \left[\text{bezw. } c \cdot \frac{dv}{du \cdot 1} \text{ entsprechend } c \cdot \frac{l}{q}\right],$$

worin c eine [Material-] Konstante ist.

Jede mathematische Transformation daher, die das System von Niveaukurven und Stromkurven u, v in ein anderes System u', v' verwandelt und der Bedingung genügt, dass

$$\frac{du'}{dv'} = \frac{du}{dv}$$

ist, und u' senkrecht zu v' ist, liefert daher ein Leitersystem, das denselben Leiterwiderstand, Selbstinduktionskoeffizienten und Kapazität besitzt, wie das ursprüngliche System u, v.

Die einfachsten derartigen Transformationen sind:

1) Die Transformation bei Ähnlichkeit, d. h. proportionale Vergrösserung aller Lineardimensionen.
2) Die Transformation durch reziproke Radien oder Kreisverwandtschaft.

Diese beiden Transformationen sind die einzigen elementaren Verwandtschaften dieses Charakters.

Da zwischen konzentrischen Cylindern und ihren Schnittfiguren mit einer Vertikalebene, konzentrischen Kreisen, die Stromlinien Radien, die Niveaukurven konzentrische Kreise sind, und die Gesamtströmung ihren Ausdruck findet in

$$\frac{2\pi x}{ln\,\frac{R}{r}},$$

wo R und r die Radien der konzentrischen Kreise, x eine [Material-] Konstante ist, so wird durch Transformation von Kreis und Grade (I) und von zwei exzentrischen Kreisen durch reziproke Radien in zwei konzentrische Kreise (II) die Strömung zwischen diesen Gebilden bestimmt.

I) Verwandlung von Kreis r und Linie p (Leitungsdraht und Erde als Rückleitung im Abstand d) in zwei konzentrische Kreise liefert für r klein gegenüber d

$$R = 2d,$$

d. h.:

„Widerstand, Selbstinduktionskoeffizient, Kapazität zwischen einem in der Höhe d vom Erdboden verlaufenden Leitungsdraht vom Radius r sind dieselben wie zwischen dem Leiter vom Radius r und einem konzentrischen Cylinder, dessen Radius R gleich dem doppelten Abstand $2d$ des Leiters r vom Erdboden ist."

Ist r nicht gegen d zu vernachlässigen, so ergiebt sich

$$\frac{R}{r} = \frac{2d}{r}\left\{\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{1 - \frac{r^2}{d^2}}\right\}$$
$$= \frac{2d}{r}\left\{1 - \frac{r^2}{4d^2} + \text{Restglied}\right\}.$$

II) Verwandlung zweier exzentrischer Kreise (z. B. Leitung und Rückleitung) in zwei konzentrische Kreise ergiebt allgemein:

„Zwei exzentrische Cylinder von den Radien r_1 und r_2 und dem Abstande d ihrer Mittellinien sind elektrisch und magnetisch äquivalent zu zwei konzentrischen Cylindern, deren Radien R und r bestimmt sind durch:

$$\frac{R}{r} = m \sqrt{m^2 - 1},$$

wo
$$m = \frac{d^2 - r_1^2 - r_2^2}{2 r_1 \cdot r_2},$$

also wenn r_1 und r_2 klein sind gegenüber d:

$$\frac{R}{r} = \frac{d^2}{r_1 \cdot r_2}\left\{1 - \frac{r_1^2 + r_2^2}{d^2} - \frac{r_1^2 r_2^2}{d^4} + \text{Restglied}\right\}$$
$$= \frac{d^2}{r_1 \cdot r_2}$$

und für $r_1 = r_2 = r$

$$\frac{R}{r} = \left(\frac{d}{r}\right)^2 \left\{1 - \frac{2 r^2}{d^2} - \frac{r^4}{d^4} + \text{Restglied}\right\}$$
$$= \left(\frac{d}{r}\right)^2.$$

Hierdurch werden exzentrische Cylinder, und Cylinder und Ebene auf konzentrische Cylinder zurückgeführt.

Für zwei exzentrische Cylinder und für Cylinder und Ebene ergiebt sich durch Substitution der mittels der Transformation durch reziproke Radien für $\frac{R}{r}$ gefundenen Werte:

	Für zwei konzentrische Cylinder mit den Radien r und R	Cylinder vom Radius r im Abstand d von der Ebene, entsprechend Leitungsdraht vom Radius r im Abstand d über dem Erdboden	Zwei Cylinder vom Radius r und Abstand d entsprechend zwei Leitungsdrähten vom Radius r und Abstand d
Elektrostatische Kapazität in ESE	$\frac{\varkappa \cdot l}{2\, ln \frac{R}{r}}$	$\frac{\varkappa l}{2\, ln \frac{2d}{r}}$	$\frac{\varkappa \cdot l}{4\, ln \frac{d}{r}}$
Elektrostatische Kapazität in Mikrofarad	$1{\cdot}11 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\varkappa l}{2\, ln \frac{R}{r}}$	$1{\cdot}11 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\varkappa l}{2\, ln \frac{2d}{r}}$	$1{\cdot}11 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\varkappa \cdot l}{4\, ln \frac{d}{r}}$
Elektrischer Leitungswiderstand in Ohm	$\frac{\varrho}{2\pi l} \cdot ln \frac{R}{r}$	$\frac{\varrho}{2\pi l} \cdot ln \frac{2d}{r}$	$\frac{\varrho}{\pi l} \cdot ln \frac{d}{r}$
Elektrisches Leitungsvermögen in Mho	$\frac{2\pi l}{\varrho \cdot ln \frac{R}{r}}$	$\frac{2\pi l}{\varrho \cdot ln \frac{2d}{r}}$	$\frac{\pi l}{\varrho \cdot ln \frac{d}{r}}$
Magnetischer Widerstand $S_m = \frac{4\pi}{10} J : N$ in CGS-Einheiten	$\frac{2\pi}{\mu \cdot l \cdot ln \frac{R}{r}}$	$\frac{2\pi}{\mu \cdot l \cdot ln \frac{2d}{r}}$	$\frac{\pi}{\mu \cdot l \cdot ln \frac{d}{r}}$
Magnetischer Selbstinduktionskoeffizient (pro Leiterpaar)[1] in Henry $L = N \cdot 10^{-8} : J \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-9} \cdot \mu \cdot l \cdot ln \frac{R}{r}$	$2 \cdot 10^{-9} \cdot \mu \cdot l \cdot ln \frac{2d}{r}$	$4 \cdot 10^{-9} \cdot \mu \cdot l \cdot ln \frac{d}{r}$

1) Mit Vernachlässigung des im Innern des Leiters erzeugten magnetischen Kreislaufes (vgl. H. I, 2). Für Luft sind μ und $\varkappa$ gleich 1.

Wie ersichtlich, ist das Verhältnis der Werte in den beiden letzten Vertikalreihen dasselbe, wie es sich aus der obigen Betrachtung über den Ausbreitungswiderstand und einer leitend gedachten Spiegelebene ergab.

116. **Dielektrisches Spannungsgefälle abhängig von x und Leiterform.**

Jetzt möge der Einfluss des gleichzeitigen Vorhandenseins oder des Zusammenbringens verschieden leicht verschiebbarer Dielektrika, d. h. solcher mit verschiedener Dielektrizitätskonstante, im Feld betrachtet werden und sogleich anschliessend der Einfluss anderer nicht direkt geladener Leiter im Felde.

Es seien in Fig. 54 A und B die wiederum als parallele ebene Platten gedachten Belegungen (Grenzflächen) (vgl. Fig. 51); diese, gut isoliert, seien mit einer bestimmten elektrischen Spannung E geladen worden, als die zwischen A und B befindliche Zwischenschicht noch aus einem homogenen Dielektrikum D_I z. B. Luft bestand. Von dem elektrostatischen Streufeld ausserhalb der ins Auge gefassten Zwischenschicht (vgl. oben) möge im Folgenden abgesehen werden,

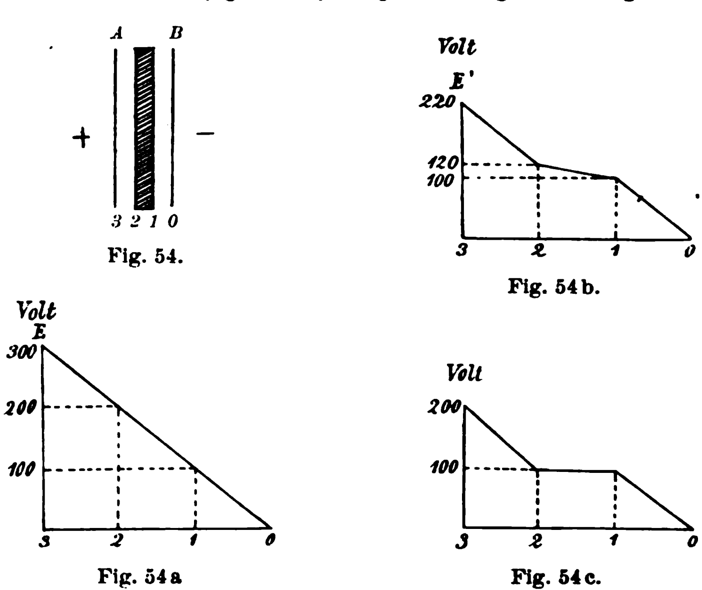


Fig. 54. Fig. 54 b. Fig. 54 a Fig. 54 c.

da es für diese Betrachtungen gleichgiltig ist. Das Druckgefälle (Spannungsgefälle) in dem homogenen elektrostatischen Feld zwischen A und B wird gemäss der Gleichförmigkeit von D_I längs der senkrecht zu A und B verlaufenden Verschiebungslinien (Kraftlinien) konstant sein. Die ganze Spannungsdifferenz E in jedem cylindrischen Verschiebungskanal wird sich sonach auf die einzelnen Teilstrecken proportional verteilen (vgl. **65**), so dass z. B. bei Ladung mit der Spannungs**differenz** von 300 Volt, wenn A das Spannungs**niveau** + 300 Volt, B das **Nullniveau** der Zählung annimmt, das Zwischenmedium durch die Niveauflächen 100 und 200 Volt, welche parallel zu A und B verlaufen (vgl. Fig. 51) in drei gleiche Scheiben zerfällt. Wird der Abstand l als Abscisse, das zugehörige Spannungsniveau (Potential) als Ordinate aufgetragen, so erhält man die graphische Darstellung des Spannungsabfalles wie in Fig. 54 a als ungebrochene gerade Linie. Es trete jetzt, während alles übrige bleibt, an Stelle einer dieser drei Scheiben, z. B. der mittleren zwischen 1 und 2, ein anderes Dielektrikum D_{II} mit grösserer Dielektrizitätskonstante z. B. mit $x = 5$, so dass zur

Hervorrufung einer gleich grossen dielektrischen Verschiebung quer durch die Schicht eine kleinere Spannung an den Enden jedes Kanales erforderlich ist, z. B. für den obigen konkreten Fall an Stelle 100 Volt nur 20 Volt. Die Folgen der Einbringung jener der Ladespannung leichter nachgebenden Dielektrikumsschicht werden daher sein:

1) Bei vorher abgeschalteter Ladespannung wird nicht $E = 300$ Volt, sondern infolge der elektrischen Isolation von A und B (Inkompressibilität der Friktionsteilchen, vgl. **65**) die Ladung von A und B, d. h. die von A nach B durch die Zwischenschicht verschobene Elektrizitätsmenge Q konstant bleiben, gleichgiltig was — hinreichende Isolation vorausgesetzt — an dem elektrostatisch gespannten System verändert wird, sei es in den Dimensionen, wie in der früheren Betrachtung, sei es im Material, wie hier. Die Grösse der Gesamtverschiebung durch die Grenzflächen (A und B) bleibt ebenso wie die dielektrische Verschiebung in jeder Einheitsröhre sonach hier ungeändert; aber nur in zwei dieser Schichten beträgt die hierzu erforderliche Spannung nach wie vor den gleichen Betrag (100 Volt), in der Schicht 1,2 nur $^1/_5$ (20 Volt); die Spannung zwischen A und B sinkt also von $E_0 = 300$ auf $E_1 = 220$ Volt genau so, als wenn $^4/_5$ einer Schicht ausgeschaltet worden wäre. Die Abnahme an elektrischer Spannungsenergie (hier um $\frac{1}{2} \cdot Q\,[E_0 - E_1]$ vgl. **117**), bewirkt nach der Energiegleichung an Stelle des „Verschwindens" der Feldenergie eine gleich grosse mechanische Arbeitsleistung in Gestalt des Hineinziehens jener Platte in das Feld. Obwohl die Gesamtspannung bei Annäherung von A und B um $^4/_5$ Schichtdicke die gleiche Veränderung erleidet als durch Einschiebung einer Dielektrikumsschicht mit $\varkappa = 5$, so besteht doch ein Unterschied in der Verteilung der Niveauflächen. Auf die gleich dicke Schicht 1 bis 2 entfallen nämlich nur 20 Volt, sodass das Diagramm für den Spannungsabfall im Zwischenraum nunmehr wie in Fig. 54b sich ergiebt.

2) Bei Konstanthalten der Ladespannung von 300 Volt zwischen A und B wird die Verteilung der ganzen Spannung proportional dem dielektrischen Widerstand stattfinden, sodass der dielektrische Spannwiderstand S_d in jeder Verschiebungsröhre von $S_d = 1 + \frac{1}{5} + 1 = \frac{11}{5}$ folgende Verteilung bewirkt: die Spannung $E_{0,1}$ und $E_{2,3}$ beträgt je $\frac{5 \cdot 300}{11}$ Volt, hingegen $E_{1,2}$ nur $\frac{300}{11}$ Volt. Das Neigungsverhältnis in Fig. 54b bleibt hierbei bestehen. Da der dielektrische Widerstand S_d im Verhältnis von 15 : 11 abgenommen, also die Kapazität C im umgekehrten Verhältnis zugenommen hat, so hat infolge der Spannungskonstanz auch eine entsprechende Vergrösserung der Ladung stattgefunden. Das System hat also durch Zufuhr neuer elektrischer Spannungsenergie aus der äusseren Energiequelle eine Mehrung der zwischen A und B aufgespeicherten elektrischen Spannungsenergie um $\frac{1}{2} E_0\,(Q_2 - Q_0)$ d. i. $\frac{4}{15}$ des ursprünglichen Betrages erfahren. Dies ist der vom Kondensator aufgenommene Betrag. Der von der Energiequelle abgegebene Betrag ist $E_0 \cdot \int_0^t i\,dt$, wenn t die Zeit nach praktisch vollzogener Vollendung der Ladung bezw. Nachladung angiebt. Im allgemeinen deckt sich dieser Betrag nicht mit $\frac{1}{2} E_0\,(Q_2 - Q_0)$, vielmehr ist der Zahlenfaktor des Integrals bei Einführung des zeitlichen Stromverlaufes bei der Ladung grösser als $\frac{1}{2}$. Die Differenz wird zum Teil als JouLEscher Verlust in der Zuleitung verbraucht; der Rest hingegen variiert

mit den im Feld zu leistenden Arbeiten und ist einmal durch etwaige Energieverluste (vgl. **126**) im elektrischen Feld bedingt, ein zweites Mal durch die mechanische Arbeit, wenn eine Bewegung von Feldteilen unter dem Einfluss der elektrostatischen Kräfte stattfindet. Jene Differenz wird daher grösser sein, wenn die Schicht 1, 2 unter dem Einfluss der ponderomotorischen Kräfte (energetisches Sinken durch Überführung elektrischer Spannungsenergie in mechanische Energie, vgl. oben und **134**) erst entgegen mechanischen Bewegungswiderständen in das Feld hineingezogen wird, als wenn sie bereits vorher sich in demselben befindet.

Die Folgerungen aus der oben benutzten Thatsache, dass die Spannung im Dielektrikum proportional mit dem dielektrischen Widerstand S_d jeder Zwischenschicht sich verhält, sodass das Spannungsgefälle, d. i. die Spannung, welche auf die Einheit der Schichtdicke, z. B. 1 mm entfällt, von der Verteilung der S_d Werte zwischen den beiden Metallbelegungen abhängt, ist von der grössten praktischen Wichtigkeit für die Kabelfabrikation, namentlich bei Hochspannungskabeln.

Stellt Fig. 52 den Querschnitt eines Kabels dar, bei welchem ϱ_1 der äussere Radius des inneren Leiters, ϱ_2 entweder der mit der Erde verbundene Bleimantel oder bei konzentrischen Kabeln der innere Radius des äusseren Leiters sein möge, so wird in beiden Fällen die vorhandene Spannung sich nicht gleichförmig verteilen, vielmehr wird die Beanspruchung der inneren Isolationsschichten auf dielektrische Bruchfestigkeit bedeutend höher sein als der Mittelwert. Da nämlich der dielektrische Widerstand S_d' einer konzentrischen Schicht des Dielektrikums für jede Längeneinheit des Kabels (vgl. **114**)

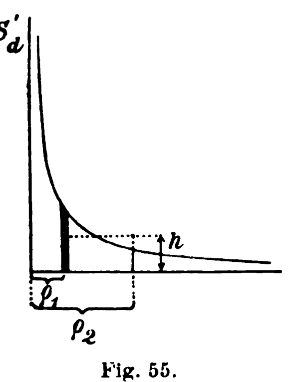


Fig. 55.

$$S_d' = \frac{l}{q \cdot \varkappa} = \frac{d\varrho}{2\pi\varrho \,.\, 1 \,.\, \varkappa},$$

so folgt für ein gleichmässig um dieselbe Schichtdicke fortschreitendes $d\varrho$, z. B. gleich 1 mm und homogenes Material, d. h. $\varkappa =$ konstant

$$S_d' = c \cdot \frac{1}{\varrho},$$

d. h. die Werte S_d' der Dielektrikumsschichten von gleicher Dicke gehören einer Hyperbel an und werden durch das zwischen den Grenzen ϱ_1 und ϱ_2 liegende Stück derselben dargestellt (vgl. Fig. 55); das S_d' der an ϱ_1 angrenzenden Schicht, also etwa durch den schraffierten Streifen. Da nun wegen Reihenschaltung der dielektrischen Schichtwiderstände

$$S_d = \sum_{\varrho_1}^{\varrho_2} S_d' = \frac{1}{2\pi\varkappa \cdot 1} \cdot ln\,\frac{\varrho_2}{\varrho_1}$$

gleich der zwischen Hyperbel und Abcissenachse eingeschlossenen Fläche oder auch gleich dem hiermit gleichwertigen Rechteck $(\varrho_2 - \varrho_1)\,h$ und ferner die auf eine Einzelschicht $(d\varrho)$ entfallende Teilspannung E' durch

$$E' = \frac{S_d'}{S_d} \cdot E$$

gegeben ist, wenn E die Gesamtspannung bezw. auftretende Maximalspannung in Volt angiebt, so folgt hieraus sowohl die grosse Verschiedenheit des mit der Änderung von S_d' analogen Spannungsgefälles $\frac{E'}{E}$, als auch bei Einsetzung der absoluten Werte die dielektrische Beanspruchung E' der einzelnen Schichten des Dielektrikums. Die obigen Formeln lassen auch ohne weiteres erkennen, wie eine Änderung von $\varkappa$ der einzelnen Schichten wirkt; dass z. B. durch eine relative Vergrösserung des $\varkappa$ der inneren Schichten die Beanspruchung der Schichtdicken gleichförmiger gestaltet werden kann, dieselbe hingegen bei höheren $\varkappa$ der äusseren Schichten noch ungleichförmiger, d. h. für die innersten Schichten ungünstiger wird.[1]

Erwähnt sei noch, dass in der vorstehenden Betrachtung auf den Einfluss des begrenzten Isolationswiderstandes der Kabel keine Rücksicht genommen ist; wenn man von Verbindungsstellen oder lokalen Isolationsfehlern absieht, so wird aber der durch das gesunde Dielektrikum fliessende Strom (Verlust infolge ungenügender dielektrischer Dichtigkeit) praktisch untergeordnet sein gegenüber dem Ladestrom oder dielektrischen Verschiebungsstrom. Aus diesem Grunde würde auch die Überlagerung eines Isolationsstromes keine praktisch wesentliche Änderung der Spannungsverteilung herbeiführen, ganz abgesehen davon, dass die Verhältnisse für den Ohmschen Widerstand ganz analog liegen, wie beim dielektrischen Spannwiderstand (vgl. **68** und **114**), wenn das Dielektrikum homogen ist.

Die Neigung zwischen eins und zwei wird in der Fig. 54b um so kleiner ausfallen, je grösser $\varkappa$, d. h. je kleiner die zur Verschiebung der Friktionsteilchen der Schicht 1, 2 erforderliche elektrostatische Spannung ist. Dies leitet zu dem Grenzfall hinüber, dass $\varkappa$ praktisch unendlich gross, d. h. jene zur elastischen Verschiebung erforderliche Dauerspannung $E_{1,2}$ unendlich klein wird. Ein solcher Fall liegt bei den elektrischen Leitern vor, bei welchen der elektrische Verschiebungswiderstand Null ist. Diese verhalten sich also wie Dielektrika mit unendlich grosser Dielektrizitätskonstante. Bei Ersetzung der Schicht 1, 2 durch eine Metallplatte wird sonach bei den sonst wie oben unter 1) angeführten Verhältnissen die Spannung von $E_0 = 300$ auf $E_1 = 200$ Volt sinken, gerade so, als wenn die ganze metallische Schichtdicke ausgeschaltet würde; die hineinziehende Kraft würde also gegenüber D_{II} um $^1/_5$ grösser sein (vgl. Energieformel). Die Verteilung der Niveauflächen (Spannungsabfall zwischen A und B) mit dem Verschiebungsweg (Kraftlinienweg) als Abscisse würde wie in Fig. 54c dargestellt erfolgen, d. h. das Spannungsniveau innerhalb der leitenden Schicht ist unverändert oder die Oberfläche des Leiters bildet eine Niveaufläche (Potentialfläche), hier mit dem Wert 100. Dasselbe würde der Fall sein, wenn die Scheibe 1, 2 nur eine leitende Oberfläche besässe, da eine dauernde, durch das elektrische Feld erzeugte Verschiedenheit der Spannung zwischen den Teilen eines zusammenhängenden Leiters wegen seines verschwindenden elastischen Verschiebungswiderstandes nicht eintreten kann.

117. Influenz-Erscheinungen.

Jeder zusammenhängende Leiter, gleichviel welcher Gestalt, wird also den von ihm eingenommenen und umschlossenen Raum stets auf einen

---

1) Ein nachdrücklicher Hinweis auf die praktische Seite der Überlegungen, auch belegt mit Zahlenbeispielen und bereichert durch zahlreiche Winke für die Kabelkonstruktion ist neuerdings in einem Vortrag des englischen Ingenieurs O'Gormon (vgl. ETZ 1901, 485) erfolgt.

einheitlichen Spannungswert (Niveaufläche) bringen, woraus folgt, dass innerhalb einer leitenden Oberfläche keine von dem äusseren Feld herrührende elektrostatische Spannungsverschiedenheit oder mit anderen Worten, kein elektrostatisches Feld auftritt. Die elektrischen Kraftlinien (Induktionslinien) bedingen aber insofern einen Unterschied zwischen einem Vollleiter und einem leitenden Hohlkörper, als man sich bei ersterem die Verschiebung quer durch den Körper, d. h. für den Fall der Fig. 52 ohne Ablenkung vorzustellen hat, bei letzterem aber nicht durch den dielektrischen Innenraum, sondern in der leitenden Oberfläche, also stark abgelenkt. Dies letztere Verhalten geht schon aus der Überlegung hervor, dass der innere dielektrische Raum hinsichtlich des (elastischen) dielektrischen Widerstandes als parallel geschaltet zu den leitenden Oberflächenwegen anzusehen ist. Da nun der (elastische) Verschiebungswiderstand auf den letzteren unendlich klein ist gegenüber demjenigen des Innenraumes, möge derselbe auch von einem Dielektrikum mit noch so grosser, aber endlicher Dielektrizitätskonstante ausgefüllt sein, so wird der Innenraum wegen des immerhin endlichen Widerstandes völlig elektrisch geschützt, d. h. ohne Kraftlinien (Induktionslinien) bleiben.

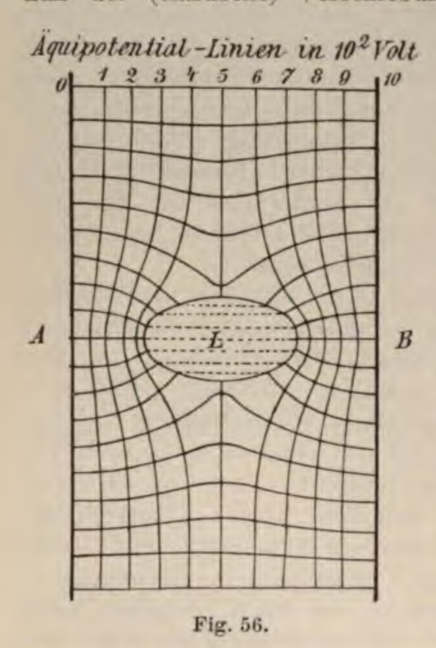


Fig. 56.

Nun könnte hier vielleicht der Schluss naheliegend erscheinen, dass, wenn in ein elektrisches Feld, welches zunächst homogen gedacht sei, ein beliebig gestalteter Leiter, z. B. ein Rotationsellipsoid hineingebracht würde, dieser alle Induktionslinien auf sich zuleiten müsste, doch erkennt man dies unschwer als Trugschluss, wenn man die Beschränkung berücksichtigt, welche in diesem Falle der beiderseitige Ausbreitungswiderstand der Sammlung von Kraftlinien (Induktionslinien) verursacht. Thatsächlich wird der Leiter L in seiner Umgebung eine Störung des homogenen Feldes herbeiführen, etwa wie in Fig. 56 angedeutet, indem in der Nähe von L eine Verdichtung der elektrischen Kraftlinien (Induktionslinien) eintritt, da ihr Weg l durch Ausschaltung der Leiterstrecke (vgl. oben) verkürzt wird und der dielektrische Widerstand dadurch eine entsprechende Verkleinerung erfährt; andererseits wird er aber wieder vergrössert durch die Zusammendrängung der Kraftlinien (Induktionslinien) in Gestalt einer scheinbaren Anziehung derselben nach den elektrischen Polen von L hin. Diese Ablenkung wird soweit reichen, als die Summe der Wege $AL + LB$ kürzer ist als die nächste, nicht mehr auf L an einer Stelle einmündende und von der korrespondierenden Stelle wieder ausgehende Kraftlinie (Induktionslinie); genauer wären für die Wege die Summen der dielektrischen Widerstände der Verschiebungsröhren einzusetzen. Um wie viel also l kürzer wird, um so viel wird das mittlere q jeder Verschiebungsröhre (Kraftröhre) kleiner, da für jede von A nach B verlaufende Verschiebungsröhre (Einheitsröhre) die Gleichung

$$Q' = \frac{E}{(S_d)_1} = \frac{E \cdot (q)_m}{l}$$

gelten muss, wenn $(q)_m$ den mittleren Verschiebungsröhrenquerschnitt bezeichnet, und E für alle dasselbe sein soll. Für konstantes E lässt sich auf Grund dieser Beziehung in vielen Fällen eine ganz ungefähre Konstruktion des elektrischen Feldes in graphischer Darstellung (vgl. **112**) ausführen. Hat man zunächst für das praktisch ungestörte Feld einen Massstab für q_1 und l_1, d. i. für Kraftliniendichte und Abstand der Niveaulinien, gleichsam für die normale Energiezelle angenommen, so werden mit Hülfe der Beziehung $\frac{(q)_m}{l} = \frac{Q'}{E} =$ konstant erst die im Querschnitt angenähert parallelepipedischen Induktionsröhren in ihrem ungefähren Verlauf eingetragen und hierauf die dazu senkrecht verlaufenden Niveaulinien (Linien gleichen Druckes, Äquipotentiallinien) mit Hülfe der analogen Beziehung $\frac{q_1}{l_1} =$ konstant. Das so erhaltene Bild wird demjenigen der magnetischen Kraftlinien und Niveauflächen sehr nahe kommen, wenn an Stelle von L ein magnetisch gegenüber seiner Umgebung sehr durchlässiges Material, z. B. Eisen, in ein homogenes, durch A und B als Polflächen erzeugtes Feld hineingebracht wird. Ein wesentlicher Unterschied besteht nur innerhalb L, da es magnetische Leiter im Sinne der elektrischen Leiter nicht giebt. In dieser Beziehung würde das Eisenstück einem Dielektrikum mit sehr hohem $\varkappa$ entsprechen. Denke man sich in Fig. 56 an Stelle von L ein derartiges Dielektrikum gesetzt — in Wirklichkeit wird jedes Dielektrikum mit seinem Wert von $\varkappa$ (bezogen auf Luft) quantitativ weit hinter dem Wert der analogen Eisenpermeabilität μ (bezogen auf Luft) zurückbleiben, doch qualitativ werden die Verhältnisse entsprechend liegen — so wird wegen der leichteren Verschiebbarkeit in L auch eine der Fig. 56 ähnliche „Anziehung" der elektrischen Kraftlinien eintreten, nur um so schwächer, je kleiner $\varkappa$ ist oder je näher es dem Wert 1 als unterer Grenze liegt. Die im Dielektrikum L verlaufenden Wegstrecken der Kraftröhrenlänge l werden nämlich hinsichtlich Verschiebungswiderstand S_d nicht zu Null werden, sondern nur in ihrer Länge um $l \cdot \frac{\varkappa - 1}{\varkappa}$ verkürzt werden. Der Verlauf im Dielektrikum L in Richtung des ursprünglichen (ungestörten) Feldes, d. h. der eigentlichen Kraftlinien (vgl. **63**) ist in Fig. 56 innerhalb L punktiert angegeben. Ihre wirkliche Länge giebt durch Multiplikation mit $\frac{1}{\varkappa}$ die für die Konstruktion erforderliche reduzierte dielektrische Widerstandslänge. Somit kann man auch für alle diese Fälle einen elektrischen Leiter als Grenzfall ansehen, d. h. als Dielektrikum, bei welchem $\varkappa = \infty$.

Die in Fig. 56 angedeutete Zusammendrängung der Kraftlinien bei ihrer Einmündung an dem spitzeren Teil des Körpers in Zusammenhang mit der Verdichtung der Niveauflächen um die Spitze giebt auch ohne weiteres über die Thatsache Aufschluss, dass an jeder Spitze eine um so stärkere spezifische Spannung des Dielektrikums eintritt, je spitzer das zulaufende Ende ist. Die lineare dielektrische Verschiebung λ ist nach dem Früheren (vgl. **112**) in jeder Einheitsröhre umgekehrt proportional mit deren Querschnitt. Diese „Spitzenwirkung" wird bei geladenen Körpern in gleicher Weise wie bei dem influenzierten der Fig. 56 auftreten, da auch hier eine

Zusammendrängung der elektrischen „Kraftlinien" (Kraftröhren) von den leitenden Flächen der ganzen Spitzen**umgebung** (als der einen Kondensatorbelegung) nach der Spitze (als der anderen) erfolgt. Geht die Zuspitzung daher über ein gewisses Mass, so wird die dielektrische Verschiebung λ in dem die Spitze begrenzenden Dielektrikum so gross, dass dessen dielektrische Festigkeit bezw. Dichtigkeit (vgl. **130**) zur Isolierung nicht mehr genügt und eine sogenannte Spitzenentladung erfolgt.

Bei jedem Körper bedeutet nach der Hülfsvorstellung das Münden oder Ausgehen von elektrischen Kraftlinien oder Verschiebungsröhren, dass in die materielle Oberfläche des Körpers hinein bezw. aus ihr heraus eine Verschiebung des elektrischen Mediums (Friktionsteilchen) stattgefunden hat, also gleichsam eine elastische (vorübergehende) Verdrückung der beim unelektrischen Körper sich räumlich gegenseitig völlig deckenden und durchdringenden materiellen und elektrischen Volumina bezw. ihrer Centren gegeneinander (vgl. Fig. 11 in **65**). Überall, wo an einer Körperoberfläche elektrische Kraftlinien (Induktionslinien) münden, muss dieselbe also negativ elektrisch erscheinen, wo solche ausgehen positiv. Diese Wirkung des elektrischen Feldes auf jeden hineingebrachten Körper bezeichnet man als Influenz. Die oben bei Fig. 56 verfolgte Erscheinung, dass die Verschiebungsröhren den Körper im elektrischen Feld durchsetzen und sich bei leichterer dielektrischer Verschiebungsfähigkeit seiner Friktionsteilchen (grösserem $\varkappa$) gegenüber dem $\varkappa$ des umgebenden Dielektrikums ihm zuneigen, d. h. an seinen Enden eine polar ausstrahlende Anordnung aufweisen, pflegt man auch häufig so auszudrücken, dass man sagt: ein positiv geladener Körper (A in Fig. 56) influenziert auf der zugekehrten Seite die ungleichnamige oder negative Elektrizität auf der abgewendeten die gleichnamige oder positive. Für Leiter gilt dies auch allgemein, da deren $\varkappa = \infty$, also stets grösser als dasjenige des umgebenden Dielektrikums ist. Jedoch folgt aus den obigen Betrachtungen, dass diese Beziehung nur **relativ** gilt und bei einem dielektrischen Körper im elektrischen Felde nur — genau ebenso wie bei dem analogen magnetischen Fall — so lange zutrifft, als das $\varkappa$ bezw. magnetisch das μ des Mediums **kleiner** ist, als dasjenige des hineingebrachten Körpers. Andernfalls, d. h. wenn das $\varkappa$ bezw. μ des Mediums grösser ist, ziehen sich die Kraftlinien (Induktionslinien) nicht nach dem Körper hin, sondern von ihm weg (vgl. Fig. 57) und der influenzierte Pol ist gleichnamig, wenn man unter Beibehaltung des üblichen Richtungssinnes als Nordpol bezw. positiven Pol die Ausstrahlungsstelle (Quellpunkt) von Kraftlinien als Südpol bezw. negativen Pol die Einsaugstelle (Sinkpunkt) von Kraftlinien beim Übertritt aus einem Medium in das andere bezeichnet.

Wie die Fig. 56 und 57 erkennen lassen, findet an der Grenzfläche zwischen zwei Dielektricis mit verschiedener Dielektrizitätskonstante $\varkappa_1$ und $\varkappa_2$ eine Brechung der Kraftlinienströmung statt. Diese Brechung (Fig. 58) erfolgt nach demselben **Tangenten**gesetz wie die der Strömungslinien bei Leitern verschiedener Leitfähigkeit (vgl, H. I, 2 in **174**); in den Formeln treten nur an Stelle der Leitvermögen die Dielektrizitätskonstanten. Über eine experimentelle Bestätigung dieser Brechung vgl. v. Bezold 1884, Wied. Ann. 21, 401.

Eine den elektrischen Erscheinungen allein zukommende Seite, welche bei den magnetischen kein Analogon findet und den elektrischen gleichsam eine Mannigfaltigkeit mehr erteilt, ist das Vorhandensein zweier Körper-

klassen: Die eine umfasst die dielektrisch polarisierbaren Stoffe, welche jedoch ihren Polarisationszustand infolge elastischer Haftung (vgl. 65) nicht von einem Molekül oder Raumelement an das benachbarte weiterzugeben und so eine Summation der Einzelpolarisationen (Elektrisierungen) an ihren Enden vorzunehmen vermögen, sondern den magnetischen Polarisationszuständen entsprechend auf raumelementare oder Molekularpolarisierung beschränkt sind; den Molekularmagneten würden hierbei die Molekularladungen der elektrisch gespannten Dielektrika entsprechen (vgl. hierzu unter Krystallelektrizität in 89). Die andere umfasst die ohne magnetisches Analogon gebliebenen Leiter, welche ihren elektrischen Polarisationszustand infolge freier Beweglichkeit (im Gegensatz zu elastischer Haftung, nicht aber im Sinne von reibungsfrei, vgl. 64) von einem leitenden Raumteil (Molekül) zum andern weiterzugeben vermögen bis ans Ende des zusammenhängenden leitenden Raumes, d. h. bis zu seiner Begrenzung durch ein Dielektrikum. Diese Leitereigenschaft bedingt, dass die beiden korrespondierenden (gegensätzlichen) Ladungen nicht nur auf dem ursprünglich zusammenhängenden Leiter im elektrostatischen Feld durch „Influenz“ sich scheiden und an entgegengesetzten Oberflächenteilen gesammelt

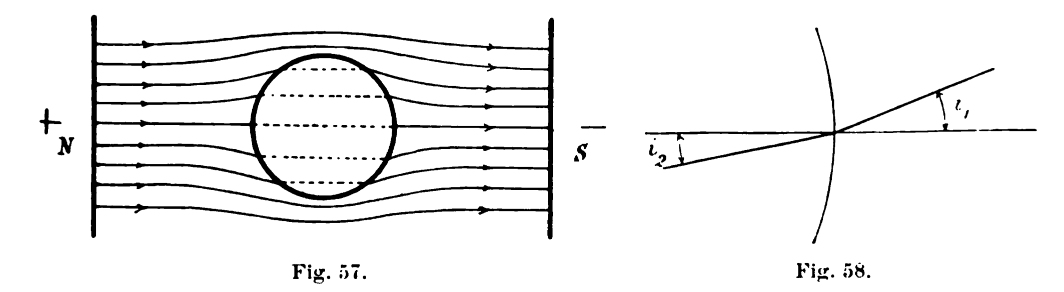


Fig. 57. Fig. 58.

werden, sondern gestattet auch durch vorübergehende Berührung einer dieser Sammelstellen mit anderen leitenden Körpern diese Scheidung räumlich noch weiter auszudehnen. Diese räumliche Scheidung der korrespondierenden Ladungen kann durch Zuhülfenahme sehr ausgedehnter Leiter, z. B. der Erde, d. h. durch vorübergehende und nachher wieder aufgehobene leitende Verbindung mit der Erde oder eines mit ihr zusammenhängenden Körpers, etwa einer Mauer oder dergl., so weit durchgeführt werden, dass jene Ladungen scheinbar keine Beziehung mehr zu einander haben. In Wirklichkeit besteht diese Beziehung stets nach wie vor, ist aber durch die vermittelnde Erde unserer unmittelbaren Beobachtung und unserm praktischen Gefühl entrückt worden. In solchem Falle pflegt man von einer Ableitung der einen Ladung zu sprechen. Die dadurch scheinbar getrennt erhaltene andere (positive oder negative) Ladung, auch positive bezw. negative Elektrizitätsmenge genannt, wird nunmehr die Verschiebungsbahnen, welche sie mit der korrespondierenden geerdeten Ladung verbinden, nach der Erde richten. Ist die vorübergehende leitende Verschiebungsbahn (Erdleitung) durch Unterbrechung und Zwischenschaltung dielektrischer Schichten aufgehoben worden, so wird nunmehr die in gleicher Stärke wie vorher bestehen bleibende Verschiebung — ausreichende Isolation der einseitigen Ladung vorausgesetzt — ihrerseits zur Erzeugung eines elektrostatischen Feldes zwischen der Oberfläche des geladenen Leiters und der Erde ge-

zwungen. Alle von ihr ausgehenden elektrischen Kraftlinien (Induktionslinien), deren Anzahl der Ladung proportional ist, werden also auf Körperoberflächen münden, die leitend mit der Erde verbunden sind und je nach deren Nähe und Gestaltung die Form und den Verlauf der Verschiebungsröhren (Kraftröhren, Einheitsröhren) bedingen.

Diese Folgerungen erklären jetzt auch, in Zusammenhang mit den bei Fig 56 gegebenen Ausführungen über den Einfluss des Widerstandes $(S_d)_1$ der möglichen Verschiebungsbahnen auf Grösse und Verteilung des elektrostatischen Ausgleiches (Feldes), sowie auf die Kapazität des Systems, dass bei zunehmender Entfernung der geladenen Grenzflächen (vgl. **114**) die Verschiebungsbahnen (Induktionslinien, Kraftröhren) mit ihren Fusspunkten nicht auf diese Flächen beschränkt bleiben, sondern gleichsam durch Ab- oder Überspringen mit ihren mittleren Teilen auf benachbarte Leiterteile, z. B. die Erde oder mit ihr verbundene Körper, neue Paare von Ansatzstellen oder Zwischenfusspunkten (vgl. Fig. 56) bilden, sobald hierdurch eine Verkleinerung von S_d möglich wird. Diese Überlegung in Verbindung mit der für den Widerstand $(S_d)_1$ und für die Dimensionen der Einheitsröhren geltenden Beziehung (vgl. bei Fig. 56) wird eine Übersicht über die Feldverteilung ermöglichen, welche praktisch oft ausreichend und vielfach um so wertvoller sein wird, als die exakte Ermittelung derselben durch Rechnung auf eine zu geringe Zahl von regelmässigen und abstrakten Fällen beschränkt ist.

118. Energetische Betrachtungen und Einteilung der Erscheinungen.

Die energetische Seite des elektrischen Feldes ist nicht nur für das Feld selbst, sondern auch für das Verständnis des später folgenden Verhaltens der Körper im elektrischen Felde von der grössten Wichtigkeit.

Die Versetzung einer dielektrischen Schicht sowie des ganzen elektrischen Feldes aus dem neutralen in den Spannungs- oder Zwangszustand erfordert, wie die Erzeugung jedes anderen Zwangszustandes, z. B. Dehnung eines elastischen Stabes (zunächst innerhalb der Elastizitätsgrenze) oder Spannen einer Feder, eine gewisse Menge Arbeit oder Energie, welche bei diesem Vorgang in dem System als sogenannte potentielle Energie aufgespeichert und in ihrem ruhenden Zustand gleichsam latent wird. Bezeichnen wir die letztere als Spannungsenergie gegenüber der sogenannten kinetischen oder Bewegungsenergie, so besteht für das Verhältnis dieser beiden das weitverzweigte und sich über mehrere Energieformen erstreckende Grundgesetz, dass die Spannungsenergie stets das Bestreben bewahrt, sich von selbst in Bewegungsenergie umzusetzen. Dieser Übergang vollzieht sich überall in dem Masse, als es die vorhandenen Bewegungswiderstände in Verbindung mit den etwa vorhandenen (der Spannkraft gleichartigen) Gegenkräften zulassen. Auf die Relativität der beiden im entgegengesetzten Sinne wirkenden Kräfte, sowie die praktisch meist übliche Umkehrung in der Bezeichnung, wonach stets die kleinere als „Gegenkraft", die grössere, den wirklichen Ausgleich beherrschende als primäre oder Hauptkraft erscheint, ist zu achten. Dieses allgemeine Ausgleichgesetz, welches in den verschiedenen Gebieten der Physik unter veränderten Namen und zuweilen scheinbar abweichender Formulierung sich regelmässig wiederfindet (vgl. hierzu ETZ 1895, Heft 32, „Über das Ausgleichgesetz"), bedingt auch beim elektrischen Feld und seinem Zwangszustand die dynamischen Vorgänge in der einen oder anderen Richtung. Zur Erreichung des statischen oder Gleichgewichtszustandes zwischen der dielektrischen Spannkraft des Feldes und der Ladespannung ist also das Vorausgehen des dynamischen Ladevorganges unter Zuführung der

Spannungsenergie aus der äusseren Energiequelle unerlässlich. Diese Spannungsenergie lässt unter Zuziehung der mechanischen Hülfsvorstellungen eine Formulierung zu, welche den bekannteren mechanischen Vorgängen bei Leistung einer Elastizitätsarbeit völlig analog ist. Die erforderliche Energie A der elastischen Dehnung eines Stabes, welcher bei allmählichem Anwachsen der Dehnungskraft von Null bis zum Maximalwert F sich in der Länge um die Strecke λ vergrössert und in sich A als mechanische Spannungsenergie aufspeichert, ist durch das Produkt Kraft $\times$ Weg zu

$$A = \frac{1}{2} \cdot F \cdot \lambda$$

gegeben, indem man $\frac{F}{2}$ als Mittelwert der Kraft auf die ganze Weglänge λ bezogen einsetzt. Entsprechend ergiebt sich bei der Erzeugung eines elektrischen Feldes mit der Ladespannung E — zunächst für einen Verschiebungskanal (Einheitsröhre mit Querschnitt q_1) mit der endgiltigen linearen Verschiebung λ_1 (Durchbiegung der Membrane in jenem Kanal) — die erforderliche elektrische Ladeenergie A_1, welche als dielektrische Spannungsenergie im Felde aufgespeichert wird (vgl. hierzu 68) zu

$$A_1 = \frac{1}{2} \cdot E' \cdot \lambda_1 = \frac{1}{2} E \cdot q_1 \cdot \lambda_1. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Enthält der volle Querschnitt q des elektrischen Feldes n solcher Kanäle, so ist allgemein

$$\Sigma_1^n A_1 = \frac{1}{2} \Sigma_1^n E \cdot q_1 \cdot \lambda_1. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Für das obige homogene Feld wären alle λ_1 einander gleich, somit

$$A = q \cdot A_1 = \frac{1}{2} E \cdot q \cdot \lambda_1. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2a)$$

$\Sigma_1^n q_1 \cdot \lambda_1$ bezw. $q \cdot \lambda_1$ sind aber die durch jeden vollen Querschnitt des elektrischen Feldes verschobenen Friktionsteilchen (vgl. 65), das ist die Elektrizitätsmenge Q, welche zur Ladung mit der Spannung E erforderlich ist, so dass die in allen Zellen des elektrischen Feldes nach Vollendung der Ladung, d. h. Versetzung des Feldes in den Zwangszustand, aufgespeicherte Energie oder kurzweg die Spannungsenergie des Feldes sich ergiebt zu

$$A = \frac{1}{2} \cdot E \cdot Q \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2b)$$

Neben dem Bestreben jeder einzelnen Energieform aus dem Zustand der Spannungsenergie in denjenigen der Bewegungsenergie überzugehen, was man wiederum unter Heranziehung des mechanischen Bildes der „Wasserkräfte“ auch als Herabsinken von einem höheren zu einem tieferen Energieniveau (Entropiebestreben) bezeichnen kann, besteht auch zwischen den einzelnen Energieformen selbst eine derartige Rangordnung. Dies ist so zu verstehen, dass ein „Herabsinken“ auf ein tieferes Energieniveau auch durch Übergang von einer Energieform in eine andere stattfinden kann und zwar auch in allen den Fällen stattfindet, wo die höhere Energieform sich selbst überlassen und nicht durch die sie erhaltenden (konservierenden) Verhältnisse so „isoliert“, d. h. auf ihrem Niveau gehalten wird, dass sie nicht ein teil-

weises, oder auch allmählich völliges Herabsinken auf die niedere Niveaustufe auszuführen vermag. So bildet z. B. die Wärme eine gegenüber der mechanischen Energie tiefere Energiestufe, weil jede als „lebendige Kraft“ bezeichnete mechanische Energiemenge mehr oder weniger schnell durch Reibung in Wärmeenergie übergeht.

Bei Übertragung dieser Betrachtung auf die übrigen Energieformen folgt alsdann, dass bei jedem elektrischen Feld das Bestreben den dielektrischen Zwangszustand zu vermindern sich nach zweierlei Richtung zu bethätigen sucht: Einmal durch „Entladung“ auf elektrischem Wege bei hinreichend unbeweglichen Grenzflächen, hierbei bleiben alle Dimensionsverhältnisse, welche sich auf das zwischen den Grenzflächen befindliche Dielektrikum beziehen, ungeändert, hingegen findet eine verhältnismässig gleich grosse Entspannung aller Dielektrikumsschichten des elektrostatischen Feldes statt, während die elektrische Spannungsenergie sich unter Strombildung (vgl. H. I, 2) in elektromagnetische Bewegungsenergie bezw. daran unmittelbar anschliessend durch weiteres Herabsinken in noch tiefere Energieformen (bis zur Wärme) umsetzt. Ein zweites Mal in mechanischer Bewegung bei hinreichender Isolierung der Grenzflächen, d. h. Konservierung des Zwangszustandes hinsichtlich des Entspannens durch elektrischen Ausgleich (Strom); hierbei bleibt die „Ladung“ der Grenzflächen gewahrt, d. h. die Grösse, welche wir unter der Bezeichnung „Elektrizitätsmenge“ (durch den Querschnitt verschobene Anzahl Friktionsteilchen) verstehen, hingegen findet eine völlige Entspannung von möglichst viel Dielektrikumsschichten durch Aus- oder Abschalten infolge mechanischer Bewegung der Grenzflächen nebst zugehörigen Körpern (Massen) statt. Die denkbare Kombination beider Fälle, welche wohl vereinzelt vorkommen kann, ist praktisch weniger von Belang, so dass zum Zweck besseren Verständnisses eine getrennte Betrachtung dieser beiden Fälle vorzuziehen ist und im Notfall auch die Zusammenlegung für die komplizierteren Fälle genügt.

Unter Anknüpfung an die obige Formulierung für die im Felde verfügbare Spannungsenergie

$$A = \tfrac{1}{2} \cdot E \cdot Q$$

kann man auch sagen, dass die Zwangsverkleinerung des Feldes oder die Abnahme der Spannungsenergie A im ersteren Fall (elektrischer Ausgleich) durch Verminderung von Q, im zweiten Fall (mechanischer Ausgleich) durch Verminderung von E unter Erhaltung von Q erfolgt, doch lässt sich hierfür noch eine geeignetere Formulierung finden, da im ersten Fall E nicht erhalten bleibt, sondern mit Q zusammen abnimmt. Zu diesem Zweck zerlegt man die Summenverschiebung Q (Elektrizitätsmenge, welche zur Ladung mit einer beliebigen elektrischen Druckdifferenz E zwischen den Grenzflächen erforderlich ist) in die Faktoren C und E, d. h. man setzt

$$Q = \Sigma \frac{\varkappa}{4\pi} \cdot \frac{q_1}{l_1} \cdot E = C \cdot E \text{ oder } C = \frac{Q}{E}, \quad \dots \quad (3)$$

so dass man diejenige Elektrizitätsmenge (Verschiebungsbetrag), welche für die Einheit der Druckdifferenz zur Ladung des ganzen Systems erforderlich ist, mit C bezeichnet und unter dem Begriff Ladungskapazität oder auch kurzweg Kapazität zur Charakterisierung des Systems nach dieser Richtung

(für das elektrische Einheitsfeld einer Kondensatorvorrichtung) einführt. Alsdann schreibt sich die Gleichung (2 b) für die dielektrische Spannungsenergie

$$A = \frac{1}{2} \cdot E^2 \cdot C = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \quad \ldots \ldots \quad (2\text{c})$$

und beim erstgenannten (elektrischen) Ausgleich wird in der Gleichung $A = \frac{1}{2} E^2 \cdot C$ der Faktor C konstant bleiben, also A mit E^2 proportional abnehmen, während beim zweiten Fall (Entspannung durch mechanische Bewegung) in der Gleichung $A = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$ die Ladung Q konstant bleibt, hingegen C zunimmt und dementsprechend A abnimmt.

Die elektrischen Ausgleicherscheinungen des ersten Falles, welche erstens von der Natur (Grösse, Verlauf) der äusseren Ladespannung, zweitens von dem mit der Natur (Grösse, Material) von C abhängigen jeweiligen Zwangszustand des Feldes und drittens von den Leitungskoeffizienten des Ausgleichweges abhängen, werden hinsichtlich ihres Zusammenhanges in H. I, 2 behandelt, so dass für den vorliegenden Abschnitt die auf die Kapazität C allein bezüglichen Erscheinungen und Betrachtungen verbleiben, also Eigenschaften, welche das elektrische Feld bedingen. Die Erscheinungen des zweiten Falles, welcher alle mechanischen Bewegungsvorgänge in dem elektrischen Feld oder in Verbindung mit ihm einschliesst, sind unter 3 (**133** bis **139**) behandelt. Hierbei ist aber sogleich auf eine weitere naturgemässe Unterteilung aufmerksam zu machen, welche die Einzelfälle in zwei gegensätzliche, aber gleichzeitig sich gegenseitig ergänzende Gruppen teilt, eine Teilung, die durch Hinweis auf analoge elektrodynamische Verhältnisse oder auch elektrochemische beim Akkumulator, welche dem Elektrotechniker geläufiger sind, anschaulicher gemacht werden kann. Es ist dies die Unterscheidung zwischen Ladungs- und Entladungsvorgängen (vgl. hierzu auch das in **83** Gesagte). Die Ladung fasst alle Fälle zusammen, bei denen die äussere Ladespannung grösser ist als die Gegenspannung — beim elektrischen Feld (Kondensatoren) gemessen durch den Zwangszustand (bei den Akkumulatoren durch die chemoelektrische Spannung) — so dass elektrokinetische Energie in Spannungsenergie übergeführt wird (bei den Akkumulatoren in chemische Energie); die Entladung alle Fälle, in denen der Zwangszustand des elektrischen Feldes (bei den Akkumulatoren die chemoelektrische Spannung) grösser ist als eine etwa vorhandene äussere Gegenspannung, so dass die Umkehrung jener Energiewandlung eintritt. Die entsprechende Unterscheidung bei den elektro-mechanischen Beziehungen hätte vom elektrischen Standpunkt aus als „Ladung" alle Fälle zusammenzufassen, in denen die an den Grenzflächen angreifenden Kräfte, welche durch den Zwangszustand des elektrischen Feldes geweckt werden, kleiner sind als die mechanischen Kräfte, welche an den Grenzflächenkörpern von aussen angreifen, so dass elektrische Spannungsenergie aus mechanischer Bewegungsenergie (wenigstens als Durchgangsenergie) gewonnen, d. h. umgesetzt wird; als „Entladung" alle Fälle, in denen das umgekehrte Verhältnis der ins Spiel kommenden mechanischen Kräfte vorliegt, so dass mechanische Bewegungsenergie aus elektrischer Spannungsenergie erhalten wird. Als Grundlage der Einteilung des folgenden Stoffes kann man sonach die mechanisch-elektrostatischen Wechselbeziehungen in folgender Weise charakterisieren: Der mechanischen Statik, das ist dem dynamisch-neutralen oder Gleichgewichtsfall würde die

völlige oder teilweise Bildung des elektrischen Feldes aus **festem** Isoliermaterial (Dielektrikum) entsprechen, so lange das letztere eine praktisch merkliche gegenseitige Bewegung der Grenzflächen verhindert, und demzufolge nur statische Festigkeitsbeanspruchungen in Gestalt von **mechanischem** Zwang (Druck oder Zug) auftreten (vgl. **132**); der mechanischen Dynamik würden die sogenannten „ponderomotorischen" Wirkungen im flüssigen oder gasförmigen elektrischen Feld entsprechen (**133ff**), einschliesslich der Umkehrungserscheinungen, bei denen mechanische Bewegungsenergie in elektrische Spannungsenergie übergeführt wird, wie z. B. beim ursprünglichen Kondensator (vgl. **5**) und den daraus abgeleiteten Vorrichtungen (**138** und **139**).

2. Eigenschaften der Dielektrika.

a) Bestimmung und Werte von Dielektrizitätskonstanten.

119. Bestimmungsarten der dielektrischen Materialkoeffizienten.

Die im vorigen Abschnitt benutzte Darstellung des elektrischen Feldes und des auf die elektrische Druckdifferenz E gleich der Einheit bezogenen Gesamtverschiebungsvermögens $\left(\frac{Q}{E}\right)$ zwischen den beiden Belegungen, eines kurzweg als Kapazität C bezeichneten Begriffes, ergab, dass ausser den Dimensionen l und q ein Materialkoeffizient $\varkappa$ des oder der Zwischenmedien diesen Wert $C = \frac{\varkappa}{4\pi} \Sigma \frac{q}{l}$ bedingt. Hierbei sei nochmals hervorgehoben, dass, wenn von der Kapazität **eines** zusammenhängenden Leiters (**einer** Belegung) gesprochen wird, dies nur einen Sinn giebt, wenn **stillschweigend** als **zweite** Belegung die Erde oder leitend mit ihr verbundene Teile angenommen werden (vgl. **117**). Ist das Medium nicht einheitlich, sondern die Werte von $\varkappa$ für die einzelnen Verschiebungsröhren (Induktionsröhren) oder Teile derselben verschieden, so muss naturgemäss geschrieben werden $C = \frac{1}{4\pi} \Sigma \frac{q \cdot \varkappa}{l}$ unter Zusammensetzung der einzelnen Teilwerte sowohl bezüglich l (Serienschaltung) als q (Parallelschaltung) (vgl. **68**).

Der Begriff dieses als Dielektrizitätskonstante eingeführten Materialkoeffizienten $\varkappa$ ergiebt sich nach dem Vorausgegangenen auch als das **Verhältnis der Ladungen** $Q_\varkappa$ und Q_1, oder nach MAXWELL das **Verhältnis der linearen Verschiebungen** (vgl. **118**) $\lambda_\varkappa$ und λ_1 an jeder Stelle des Feldes, wenn bei gleichbleibender Lage (l und q) und Spannungsdifferenz (E) der beiden Belegungen (Grenzflächen) einmal das in Frage stehende Dielektrikum, ein zweites Mal Luft (genauer das Vakuum) den ganzen vom elektrischen Felde praktisch eingenommenen Raum erfüllt. Absolute Messmethoden für die Ermittelung von $\varkappa$ (mit Bestimmung der Dimensionen q und l) liefern die beiden Haupterscheinungsgruppen, die natürlich ausserdem auch für vergleichende, d. h. auf Luft bezogene Messungen von $\varkappa$ geeignet sind. Von diesen beiden absoluten Bestimmungsmethoden benutzt die eine die Formel (3) in **118**

$$Q = E \cdot C = \varkappa \cdot \frac{E}{4\pi} \cdot \frac{q}{l},$$

oder

$$\varkappa = \frac{4\pi \cdot Q \cdot l}{E \cdot q},$$

um mit Hülfe einer möglichst vereinfachten Dimensionsbestimmung — l und q bei planparallelen oder wenigstens parallelen Belegungen mit kleinem Abstand l (vgl. **114**) — sowie Messung der Ladung Q und Spannung E in absolutem Mass den Wert von $\varkappa$ zu bestimmen.

Die zweite Methode, wenn sie auch als absolute Methode zunächst nicht hierfür, sondern von W. THOMSON in seinem absoluten Elektrometer für die (absolute) Spannungsmessung bei bekannten $\varkappa$ verwendet wurde, würde die in **136** behandelte Formel für die ponderomotorische Wirkung benutzen, z. B. Anziehung F zwischen zwei Belegungen nach MAXWELL

$$F = \frac{E^2 \cdot q \cdot \varkappa}{8\pi \cdot l^2} = \frac{E^2 \cdot C}{2l} = \frac{Q^2}{2l \cdot C}$$

oder

$$\varkappa = \frac{8\pi \cdot F \cdot l^2}{E^2 \cdot q},$$

um aus den in absolutem Mass gemessenen Werten der rechten Seite $\varkappa$ zu ermitteln. Für relative Bestimmungen des $\varkappa$ von Flüssigkeiten (bezogen auf Luft) ist diese Methode durch vergleichende Messung von $F_\varkappa$ und F_1 von QUINCKE (WIED. Ann., 1883, 19, 705 und 1896, 28, 530) benutzt worden.

In entsprechender Weise lässt sich auch die erste Methode und Formel durch Vergleichung der Ladungen $Q_\varkappa$ und Q_1 bezw. Kapazitäten $C_\varkappa$ und C_1 bei sonst völlig gleichen Bedingungen (E, q und l) und nur gewechseltem Dielektrikum (z. B. einmal Luft, einmal Isolierflüssigkeit) zwischen den unveränderten Belegungen zur Vergleichung zweier Dielektrizitätskonstanten verwerten. Ob man nun die Ladungen Q selbst misst, z. B. mittelst Schwingungsgalvanometers, oder die Kapazitäten C durch irgend eine Messmethode (technisch wichtige Messmethoden von Kapazitäten siehe Bd. II, die mehr physikalischen für die Ermittelung vieler der folgenden Werte von $\varkappa$ benutzten namentlich WIED. II, 38 u. ff.) mit einander vergleicht, besitzt nur messtechnisches Interesse, ist aber an sich theoretisch gleichgiltig. Nur ist es einleuchtend, dass praktisch die eine Methode der anderen überhaupt oder für bestimmte Zwecke, d. h. zur Bestimmung gasförmiger, flüssiger oder fester Leiter überlegen sein wird. Eine für alle Fälle verhältnismässig bequem anzupassende Methode ist die sogenannte Kapazitätsmethode, d. h. Vergleichung der Kapazitäten $C_\varkappa$ und C_1; nur muss bei festen Dielektricis auf Beseitigung oder Korrektur der Fehlerquellen ausreichend Sorge getragen werden, worauf namentlich BOLTZMANN (1872, Wien. Sitz.-Ber. 66, 1 und 1873, 67, 17) hingewiesen hat. Deshalb benutzt eine für viele Zwecke, namentlich zur Bestimmung der $\varkappa$ fester Körper, wichtige Gruppe der Messverfahren, jetzt nicht mehr die Ausfüllung des ganzen Feldraumes mit dem zu untersuchenden Dielektrikum, sondern nur die Einbringung regelmässig gestalter Körper, namentlich Platten, in das Feld und Untersuchung ihres Einflusses entweder auf die Ladung Q bezw. die Kapazität C, oder auf die Grösse F der ponderomotorischen Wirkung. Nach den Ausführungen zu Fig. 54 (in **116**) ergiebt sich ohne weiteres die Art der Rückwärtsbestimmung von $\varkappa$; so wird z. B. für den dort angenommenen Fall, dass die Plattendicke $\frac{l}{3}$ beträgt, das Verhältnis

$$C_\varkappa : C_1 = \frac{1}{2 + \frac{1}{\varkappa}} : \frac{1}{3}$$

oder $$\varkappa = C_x : (3\, C_1 - 2\, C_x),$$

wobei jedoch von Korrektionen abgesehen ist.

Diese Methoden der Bestimmung von $\varkappa$ bei festen Dielektricis ohne direkte Berührung der Belegungen werden sogar vielfach als allein einwurfsfrei betrachtet, sobald einerseits Spuren von Leitungsfähigkeit, andererseits merkliche Rückstandserscheinungen vorliegen, welche stets mit Nachladung (scheinbarem Verschlucken von Elektrizität durch das Dielektrikum) Hand in Hand geht. Bei direkter Berührung der Belegungen mit dem Dielektrikum wird durch beide Ursachen die Kapazität C bezw. $\varkappa$ scheinbar vergrössert (vgl. **124**).

Bei Vergleichung der $\varkappa$ von flüssigen und gasförmigen Dielektricis kann als Vergleichskapazität und Messinstrument zu gleicher Zeit ein einmal mit Luft, ein zweites Mal mit der Flüssigkeit gefülltes Quadrantenelektrometer Verwendung finden (Methode von SILOW 1885, POGG. Ann. 156, 389), wobei das Verhältnis der Ausschläge bei gleicher Spannung gleich demjenigen der Dielektrizitätskonstanten gesetzt wurde. Genauer wäre es eigentlich, wegen der Kapazitätsänderung mit dem Ausschlag (vgl. Bd. II) die Spannungen für den gleichen Ausschlag (zugleich Ladung) zu messen und deren reziprokes Verhältnis zu benutzen $\left(\text{vgl. Formel } \varkappa = \frac{4\pi \cdot Q \cdot l}{E \cdot q}\right)$.

Eine weitere Ausbildung dieser Methode zu einer Art Differentialmethode mit Hülfe von zwei Quadrantenelektrometern (1888 COHN und ARONS, WIED. Ann., 33, 24) gestattete auch die Messung von Dielektricis mit geringer Leitungsfähigkeit wie Wasser (vgl. **121** und **122**), wobei sich überraschend hohe Werte ergaben, z. B. für Wasser $\varkappa$ etwa 80, welche besonders durch ihre Nichtübereinstimmung mit der Forderung der MAXWELLschen Theorie bemerkenswert erschienen.

Viele der zahlreichen Untersuchungen von Dielektrizitätskonstanten verdanken ihre Ausführung dem Wunsche, die elektromagnetische Lichttheorie MAXWELLS zu prüfen, nach welcher der optische Brechungsexponent n einer Substanz und ihre Dielektrizitätskonstante $\varkappa$ die Beziehung $n^2 = \varkappa$ aufweisen sollte. Die Untersuchungen für Gase nach BOLTZMANN (1874, Wien. Ber. 69, 755 und 1873, P. A. 155, 407) zeigten, ebenso wie die späteren Untersuchungen von KLEMENČIČ (1885, Wien. Ber. 91, 1) nach anderer Methode, recht befriedigende Übereinstimmung, nämlich für Vakuum $\varkappa = 1$ gesetzt (vgl. Wk. IIIa, 90).

	$\varkappa$ nach Boltzmann	$\varkappa$ nach Klemenčič	n^2
Luft	1·000 590	1·000 586	1·000 5854
Wasserstoff	1·000 264	1·000 264	1·000 2774
Kohlensäure	1·000 946	1·000 984	1·000 9088
Kohlenoxyd	1·000 690	1·000 694	1.000 6700
Stickoxydul	1·000 994	1·001 158	1·001 032
Ölbildendes Gas	1·001 312	1·001 458	1·001 440
Sumpfgas	1·000 944	1·000 952	1·000 884

Bereits bei den Dämpfen ergaben sich aber erhebliche Abweichungen. Bei flüssigen und festen Dielektricis standen einigen gut stimmenden Werten andere gar nicht stimmende gegenüber und die auffallendsten Abweichungen zeigten nicht völlig isolierende wie Wasser.

120. Bedingungen, welche den Wert von $\varkappa$ beeinflussen.

Hier wird es sich weniger darum handeln, alle gefundenen Werte für $\varkappa$ zusammenzustellen (für einige wichtigere Stoffe vgl. **121** ff., sonst WIED. II, 32 bis 106 oder Wk. III a, 73 u. ff. oder Tabellen von LANDOLT und BÖRNSTEIN) als vielmehr die Gesamtheit etwas kritisch zu beleuchten. Ein Vergleich aller bisherigen Messungsergebnisse lässt zunächst, wie vielfach bei derartigen Materialkoeffizienten mit noch nicht hinreichend aufgeklärten Beziehungen zu den verschiedenen sie beeinflussenden Bedingungen, erhebliche Abweichungen für gleichbenanntes Material erkennen. Wichtiger als die Angabe der verschiedenen oft vielstellig angegebenen Messresultate, die aber für gleichbenanntes Material unter einander oft schon in der ersten Stelle abweichen, scheint fürs erste ein Eingehen auf die Ursachen dieser Abweichungen. Eine Hauptursache, welche bei der Angabe von irgend welchen anderen Materialkoeffizienten stets wiederkehrt, wenn auch in verschieden starkem Masse, bildet die Unbestimmtheit bezw. Verschiedenheit chemischer und physikalischer Natur von Material, das unter gleichem Namen geht. Eine sogenannte Reinheit ist zwar in einigen Fällen ausreichend erzielbar in anderen, praktisch besonders wichtigen, wird aber diese Verschiedenheit erhebliche Differenzen der Materialkoeffizienten, hier der Dielektrizitätskonstanten, veranlassen; ja bei weiterer Entwickelung der Wissenschaft und Messtechnik pflegen gerade die Materialkonstanten der verschiedensten Art zur Charakteristik, d. h. genaueren Bestimmung eines Materials verwendet zu werden. Für die Elektrotechnik braucht in dieser Beziehung nur an die früher kaum beachteten magnetischen Koeffizienten des Eisens erinnert zu werden, die für viele Zwecke gegenwärtig zur Charakteristik einer Eisensorte den früher allein benutzten Festigkeitseigenschaften gegenüber stark in den Vordergrund getreten sind. Eine ähnliche Entwickelung ist bei weiterer Ausbildung der Kabeltechnik auch bei den dielektrischen Eigenschaften denkbar.

Die Materialzusammensetzung, sowie die als „Struktur“ bezeichnete Beschaffenheit der Stoffe bedingen den Wert von $\varkappa$ aber nicht allein, wobei die einfache Bezeichnung, wie Glimmer, Petroleum u. dergl. seine Grösse zwar im wesentlichen aber doch in vielen Fällen nur mit ziemlich beschränkter prozentualer Genauigkeit zum Ausdruck bringen. Die Veränderlichkeit des Wertes $\varkappa$ bewirken noch eine Reihe weiterer Momente. Auch hier lässt sich eine gewisse Gesetzmässigkeit in der Entwickelung der Erkenntnis auffinden, wie sie bei allen sogenannten Material*konstanten* sich vollzieht. Diese Entwickelung drängt bald früher, bald später, je nach der Augenfälligkeit, dem praktischen Interesse oder anderen hier in Frage kommenden Momenten, zu weiterer Unterscheidung, d. h. zu weiterer Heranziehung neuer Momente, welche jene „Konstante“ beeinflussen.

Diese Entwickelung hat bei anderen Materialkoeffizienten, wie z. B. dem elektrischen Leitungswiderstand (OHMschen Widerstand), schon ziemlich früh zur Untersuchung der Temperaturbeeinflussung geführt (vgl. **27**). Bei den Dielektrizitätskonstanten begnügte man sich aber nach der Auffindung der ersten qualitativen Unterschiede durch FARADAY (vgl. **21**) noch bis vor kurzem mit der Bestimmung bezw. Vergleichung der dielektrischen Materialkoeffizienten, ohne offenbar an einen erheblichen Einfluss der Temperatur zu

denken; wenigstens lässt das Fehlen einer Temperaturangabe bei den weitaus meisten Messergebnissen, selbst wenn diese auf eine grössere Anzahl Stellen angegeben sind, kaum eine andere Deutung zu, da eine entsprechende auf vier oder fünf Stellen erfolgende Angabe des elektrischen Leitvermögens eines Materials ohne Temperaturberücksichtigung vom messtechnischen Standpunkt aus als unsinnig zu betrachten wäre. Die bis auf wenige Ausnahmen (vgl. unten) noch mangelnde Bestimmung von Temperaturkoeffizienten des Wertes $\varkappa$ wird also wiederum einen Teil der Abweichungen unter den angegebenen Werten erklären.

Ein drittes Moment, welches namentlich für die Erklärurg der Abweichungen der nach MAXWELL zu erwartenden Gleichheit von $\varkappa$ und n^2 (n = Brechungsindex) eine grosse Rolle spielt und daher bei neueren Untersuchungen die Aufmerksamkeit auf sich gezogen hat, ist der Einfluss des zeitlichen Verlaufes der Spannung auf die gefundenen Werte von $\varkappa$, vor allem die Raschheit des Wechsels im Spannungszustande, oder bei periodisch-symmetrischem Wechsel der Spannungsrichtung die sekundliche Wechsel- bezw. Wellenzahl (vgl. hierzu **99**). Dieser Einfluss hat sich namentlich zwischen den Messungen mit Gleichspannungen ($\overline{E}$) einerseits, den Schwingungszahlen von Wechselspannungen ($\tilde{E}$) wie bei den TESLA- und HERTZ-Versuchen andererseits stark in den Vordergrund gedrängt und auch bei dem OHMschen Widerstand einer Leiterstrecke die Berücksichtigung unter der Bezeichnung Oberflächenwirkung (Skineffekt) (vgl. H. I, 2 in **176**) erheischt. Bei den Dielektrizitätskonstanten scheint er in erster Linie auf nicht völlig homogene Zwischenschichten, also solche mit Rückstandsbildung beschränkt zu sein, d. h. sich nicht bei Gasen für sich, wohl aber bei festen und zum Teil auch bei flüssigen Dielektricis, namentlich bei wechselseitiger und Schichtung mit Gasen (Luft), bemerkbar zu machen (vgl. die später folgenden Zahlenangaben in **125**).

Ein viertes Moment dürfte, obwohl bisher kaum beachtet, für die Entwickelung der Kabeltechnik voraussichtlich ganz besonders wichtig werden wegen des mit $\varkappa$ bezw. der Ladung zusammenhängenden Leistungsverlustes im Dielektrikum und seiner daraus resultierenden Erwärmung bei hochgespanntem Wechselstrom. Es ist dies die Abhängigkeit des $\varkappa$ von dem Spannungsgefälle (Spannungsdifferenz E_1 auf die Längeneinheit, hier Schichtdicke, vgl. in **115** bei Fig. 54 u. 55). Die Messresultate bei Gasen, sowie die Konstanz einer in gewissen Beziehungen analogen Grösse, nämlich dem bisher als unabhängig von Stromstärke bezw. Spannung gefundenen OHMschen Widerstand oder Leitvermögen $\varkappa$, haben dazu geführt, auch die elektrostatische Kapazität bezw. nach Ausscheidung der konstantbleibenden Dimensionen l und q die Dielektrizitätskonstante $\varkappa$ als konstant anzusehen, d. h. als unabhängig von der absoluten Höhe der an den Endflächen der Dielektrikumsschicht wirksamen Spannung (elektrischen Druckdifferenz E). Da für die dielektrische Materialbeanspruchung aber offenbar nicht die Gesamtspannung, sondern das Spannungsgefälle im Dielektrikum (vgl. oben E_1) in Frage kommt, so würde die Unabhängigkeit von dieser Grösse zu betrachten bleiben. Die stillschweigende Übertragung dieser Unabhängigkeit von den gasigen Dielektricis auf die meist nur mit kleineren zum mindesten in ihrer Variation sehr beschränkten Werten von E_1 vorgenommenen bisherigen Untersuchungen an flüssigen und festen, namentlich inhomogenen (etwa nicht luftfreien) Dielektricis, scheint aber in ihrer Berechtigung zweifelhaft, wie zwei frühere Beobachtungen von Quincke (1886, WIED. Ann. 28, 530 und 1887,

WIED. Ann. 32, 529) sowie Messergebnisse des Verfassers (vgl. **126**) vermuten lassen. Jedenfalls verdient diese Seite noch eingehende Untersuchung[1]), da jene bisher allerdings vereinzelten Beobachtungen darauf hinweisen würden, dass bei einigen, wenn nicht allen flüssigen und festen zum mindesten aber den inhomogenen Dielektricis mit zunehmendem Spannungsgefälle (E_1) eine Abnahme von $\varkappa$, d. h. eine ähnliche, wenn auch quantitativ schwächere Sättigungserscheinung eintritt, wie dieselbe magnetisch durch die „Knie"-Bildung der Magnetisierungskurve, d. h. Abnahme der magnetischen Durchlässigkeit (Permeabilität) μ allgemein bekannt ist.

Dass endlich fünftens im vorliegenden Fall das in verschieden grossen Spuren vorhandene Leitvermögen der Dielektrika (vgl. H. I, 2) den scheinbaren Kapazitätswert und damit die gemessene Dielektrizitätskonstante beeinflusst, indem es beide grösser erscheinen lässt, ist einleuchtend.

Nach dieser Übersicht über die Momente, welche eine Variabilität von $\varkappa$ in mehr oder weniger hohem Grade einschliessen und zusammen mit den Fehlerquellen, welche den einzelnen Bestimmungsmethoden selbst anhaften und namentlich bei stärkeren Rückstandserscheinungen (vgl. **124**) beträchtlich werden können, seien eine Anzahl Grenzwerte für $\varkappa$ angeführt, zwischen denen die von verschiedenen Forschern und nach verschiedenen Methoden bestimmten übrigen Werte sich bewegen (vgl. Wk. IIIa, 77). Die hinter dem Material in Klammer stehende Zahl giebt die Anzahl der verschiedenen Beobachter an.

121. Werte von $\varkappa$ bei Gasen und Flüssigkeiten.

Die Werte von $\varkappa$ für die wichtigeren Gasarten wurden bereits in **119** angegeben. Eine Abhängigkeit derselben von den vorausgegangenen Momenten konnte bisher nicht nachgewiesen werden, sodass dieselben fürs erste als konstant anzusehen sind. Im übrigen sind auch die Abweichungen von der Einheit so gering, dass praktisch ohne merklichen Fehler davon abstrahiert und namentlich die technisch wichtige Dielektrizitätkonstante der Luft ohne Bedenken als Einheit selbst benutzt werden kann.

---

1) Eine solche eingehende Untersuchung dieser Seite ist nach der ersten Niederschrift von H. I, 1 publiziert worden (vgl. HOOR, ETZ 1901, 170 und ff.):

Sorgfältige Untersuchungen an einem ganz ähnlich konstruierten Kondensator wie der Hochspannungskondensator III der in **123** erwähnten Kondensatorstudien des Verfassers haben unzweifelhaft die starke Abhängigkeit des $\varkappa$ bezw. der wirksamen Kapazität von der dielektrischen Beanspruchung $\left(\text{Spannungsgefälle } \frac{dV}{dn}\right)$ ergeben und zwar die Verkleinerung von $\varkappa$ mit wachsender Beanspruchung. Gleichzeitig ist hiermit auch die qualitative Richtigkeit der in **126** ausgesprochenen Vermutung über den Verlauf der Kurve der dielektrischen Energieverluste abhängig von der Betriebsspannung wahrscheinlich gemacht.

Eine weitere Serie von Artikeln desselben Verfassers (ETZ 1901, 716 und ff) über seine gross angelegten Versuchsreihen „Zur Naturgeschichte dielektrischer Körper" ist während des Beginnes der Drucklegung nachgefolgt, worauf Interessenten für diese Erscheinungen ausdrücklich verwiesen seien. Dieselben bestätigen nicht nur von neuem meine obenstehende, mir von Physikern bisher immer bestrittene Vermutung von der Veränderlichkeit von $\varkappa$ mit dem Gefälle bezw. der spezifischen Beanspruchung $\frac{dV}{dn}$, sondern bilden auch hinsichtlich der Nachlade- bezw. Rückstandserscheinungen, welche VON HOOR unter dem Namen viskose Erscheinungen zusammenfasst, eine wertvolle Ergänzung meiner unten folgenden Untersuchungen (vgl. **125**) über die letzteren. Ausserdem weisen sie auf ein weiteres, oben nicht erwähntes Moment hin, das alle dielektrischen Erscheinungen erheblich zu beeinflussen vermag, nämlich die Schichtendicke des dielektrischen Materials (vgl. a. a. O., 784). Der Hauptwert der Untersuchungen dürfte in Richtung der systematischen Erforschung des Einflusses dieser Momente, namentlich der spezifischen Beanspruchung $\frac{dV}{dn}$, liegen.

So gering aber auch die prozentuale Abweichung von der Einheit ist, so gewinnen diese Dielektrizitätskonstanten doch eine Bedeutung, sobald man die Abweichungen für sich ins Auge fasst, also für alle Gase den Wert $D - 1$ bildet. Dass dieser Wert, die sogenannte „Elektrisierungszahl“, zu der chemischen Valenzzahl der Gase oder ihrer sogenannten „Wertigkeitssumme“ s in einer bestimmten Beziehung steht, hat R. LANG (1895, WIED. Ann. 56, 534, auch 1896 ETZ, 68) gezeigt und für die Gase mit zuverlässig bestimmten Werten von D sehr nahe die Formel

$$D - 1 = s \cdot 123 \cdot 10^{-6}$$

als gültig gefunden.

Eine grössere theoretische Bedeutung gewinnt dies für die dielektrische Festigkeitsverhältnisse, sowie die Erscheinungen der Gasentladungen (vgl. 128), wo die Valenzstellen als Fusspunkte von elektrostatischen Kraftröhren aufgefasst werden und die Verschiebungen bezw. Trennungen dieser „Valenzladungen“ beim Übergang zur Leitung durch Dissoziation oder Jonisierung der Moleküle eine grosse Rolle spielen.

Die für einige wichtigere Flüssigkeiten gefundenen Werte der Dielektrizitätskonstanten (weiteres siehe Wk. IIIa, 86 u. ff., oder WIED. II, 38 u. ff., oder Tabellen von LANDOLT und BÖRNSTEIN) bewegten sich in folgenden Grenzen:

Dielektrizitätskonstanten von Flüssigkeiten
($\varkappa$ für Luft = 1)

		$\varkappa$			$\alpha_\varkappa \cdot 10^4$	$\varkappa_0$ für 15° C.
Petroleum (9)	zwischen	1·92	und	2·35		
Terpentinöl (8)	„	2·187	„	2·332	— 10	2·28
Schwefelkohlenstoff (6) .	„	1·81	„	2·739	— 40	2.50
Ricinusöl (5)	„	4·61	„	4·78	— 107	
Benzol (9)	„	1·948	„	2·43	31	
Äther (4)	„	3·960	„	4·95		4·27
Äthylalkohol (3) . . .	„	24·29	„	27·4		25·02
Methylalkohol (1) . . .		32·7				34·05
Destilliertes Wasser (2) .	„	76	„	83.7		75·5

Unter $\varkappa_0$ sind die von THWING bei Untersuchung mit HERTZschen Schwingungszahlen erhaltenen Werte beigefügt (vgl. 122).

Die bisher nur ganz vereinzelt untersuchten Temperaturkoeffizienten von $\varkappa$ nach der Formel

$$\varkappa_x = \varkappa_a [1 + \alpha_\varkappa (x - a)],$$

worin $\varkappa_x$ die Dielektrizitätskonstante bei beliebiger Temperatur x, $\varkappa_a$ diejenige für die gewählte Normal- oder Ausgangstemperatur a bezeichnet, sind für Celsiusgrade mit 10^4 multipliziert unter α beigefügt und erwiesen sich bisher überall negativ, d. h. $\varkappa$ nimmt mit der Temperatur ab.

Für absoluten Alkohol fand ABBEG (1897, WIED. Ann. 60, 54) bei $+14 \cdot 8^0$ C. $\varkappa = 26 \cdot 4$ hingegen bei $-86 \cdot 0^0$ C. $\varkappa = 44 \cdot 7$. Aus dem Gang der Änderung bei Äther, Amyl- und Äthylalkohol gelangt er für obige Temperaturgrenzen zur Aufstellung der Formel

$$-\frac{d\varkappa}{dT} = \frac{\varkappa}{190},$$

wenn T die absolute Temperatur bezeichnet, d. h. je grösser $\varkappa$ desto grösser der Temperaturkoeffizient, ein wie es scheint allgemeingiltiger Satz.

Abweichende Ergebnisse bei sehr tiefen Temperaturen von FLEMING und DEWAR (vgl. Ph. Z. II, 43) lassen den Einfluss von T und des Aggregatzustandes auf $\varkappa$ aber noch weiterer Klärung bedürftig erscheinen (siehe hierzu auch **124**).

Die für alle Dielektrika, namentlich aber für Flüssigkeiten wichtige Frage, ob die unerwartet hohen Zahlen für $\varkappa$ bei nicht völlig isolierenden Dielek-

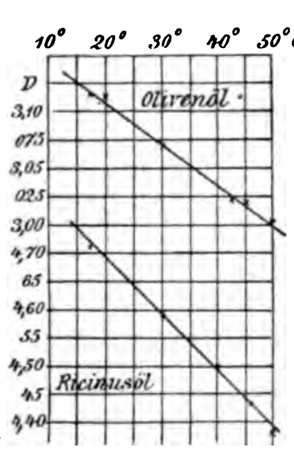


Fig. 59.

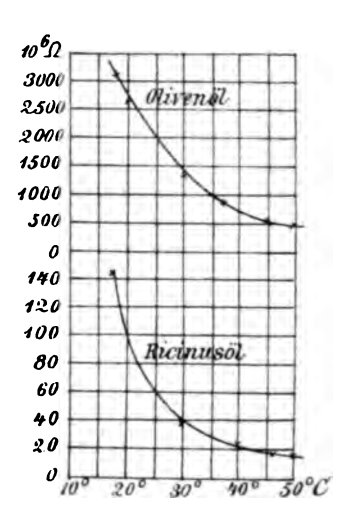


Fig. 60.

tricis auf die schwache Leitungsfähigkeit zurückzuführen sind, wird durch die Thatsache verneint, dass bei gleichzeitiger Messung von $\varkappa$ und ϱ (spezifischer Leitungswiderstand bezw. spezifisches Leitvermögen k) des mangelhaft isolierenden Dielektrikums die Änderung der Werte mit dieser Annahme unvereinbar erscheint, sei es, dass die Änderung durch Erwärmung oder bei Flüssigkeitsgemischen auch durch Erhöhung der Leitfähigkeit mittels Vermehrung des besser leitenden Bestandteiles vorgenommen wird. Überhaupt stimmt weder die Richtung noch die Grössenordnung der Änderung. Einmal ändern sich, wie jene Annahme es bei Temperatursteigerung verlangen würde, $\varkappa$ und ϱ nicht im entgegengesetzten Sinne, ein zweites Mal ist die Änderung des ϱ von ganz anderer Grössenordnung als die des $\varkappa$. Am augenfälligsten dürfte dies durch die graphische Darstellung (Fig. 59 und 60) der vom Verfasser erhaltenen Ergebnisse (vgl. ETZ 1896, 501) sein. Die mit Wechselstrom durchgeführte Untersuchung, welche unter Benutzung eines rotierenden Doppelkommutators (Secohmmeters) eine passend abgeänderte Kapazitätsmethode zur Messung von $\varkappa$ (bezogen auf Luft $= 1$) verwendet, gestattete

einerseits gleichzeitig die Feststellung von $\varkappa$ und ϱ (spezifischer Widerstand in Ohmcentimeter), andererseits die Bestimmung beider Werte ($\varkappa$ und ϱ) innerhalb gewisser Temperaturgrenzen.

In der Figur 60 erfolgte die Auftragung der direkt gemessenen Widerstände in $10^6 \Omega$, während die spezifischen Widerstände ϱ auf Grund der Gefässabmessungen durch Multiplikation mit 9550 erhalten werden, so dass bei Olivenöl $\varrho_{18} = 2{\cdot}86 \,.\, 10^{13} \Omega \,.\, \mathrm{cm}$ und bei Ricinusöl $\varrho_{18} = 1{\cdot}33 \,.\, 10^{12} \Omega \,.\, \mathrm{cm}$ sich ergiebt.

Schon der Verlauf der Kurven (vgl. Fig. 59 und 60) lässt den völlig anderen Charakter des Temperaturkoeffizienten bei ϱ gegenüber $\varkappa$ erkennen, sowie die Ordinatenwerte die andere Grössenordnung; während ϱ mit einer höheren Potenz der Temperaturdifferenz $(x - a)$ variiert, ist $\varkappa$ innerhalb der Messgrenzen offenbar linear mit $(x - a)$ veränderlich, sodass man für Olivenöl setzen kann $\varkappa_0 = 3{\cdot}11\,[1 - 0{\cdot}00364\,(t - 20)]$ und für Rizinusöl $\varkappa_R = 4{\cdot}70\,[1 - 0{\cdot}0107\,(t - 20^0)]$; beides etwa für technisch übliche Wechselzahlen.

Die hier verwendete Messmethode — Parallelschaltung der zu messenden Kapazitäten zu Zweigen der Wheatstonebrücke aus grossen Widerständen (vgl. Bd. II) — benutzt zur gleichzeitigen Bestimmung von ϱ die bereits von MAXWELL gemachte Annahme, dass jedes unvollkommene Dielektrikum in zwei parallel geschaltete Zweige zerlegt, bezw. durch sie ersetzt werden kann, von denen der eine nur Kapazität mit unendlich grossem Widerstand, der andere nur den entsprechenden Isolationswiderstand ohne merkliche Kapazität enthält. Hieraus würde sich eine einfache Superposition von dielektrischer Polarisation (Verschiebung) und Leitung ergeben für alle diese der Übergangsklasse (vgl. **111**) angehörigen Substanzen. MAXWELL nahm also eine völlige Unabhängigkeit von dielektrischer Polarisation und Verschiebung von einander an, was auch durch die bisher bekannten Thatsachen bestätigt zu werden scheint. Aus der hiernach folgenden Gleichung für die Elektrizitätsbewegung in der zum Kondensator führenden Leitung

$$\frac{dQ}{dt} = C \cdot \frac{dE}{dt} + \frac{E}{R}$$

folgert er weiterhin (vgl. Tr. I, 329 a) die auch jetzt noch als giltig angenommenen Sätze:

1) Bei einer momentanen Ladung des Kondensators ist dessen Kapazität so gross, als ob die Medien gar nicht leiteten $\left(\text{d. i. praktisch } \frac{E}{R} = o\right)$. Man erhält dann nur die Wirkung der dielektrischen Polarisation.

Daraus folgt, dass die Dielektrizitätskonstanten von unvollkommen isolierenden Medien erhalten werden können, wenn man eine momentane Ladung (oder rasch alternierende Ladungen) anwendet.

2) Wenn der Kondensator durch einen lange dauernden Strom geladen war und dann plötzlich seine Enden durch einen Draht von geringem Widerstand verbunden werden, so fliesst durch diesen Draht eine bestimmte Elektrizitätsmenge, die sich berechnen lässt. Wird aber nach dieser Entladung der Kondensator wieder isoliert, so erhalten die Belegungen wieder eine Potentialdifferenz, können also nach einiger Zeit wieder entladen werden. Diese dann zur Entladung kommende Elektrizitätsmenge ist der sogenannte Rückstand (weiteres hierzu vgl. **124** ff.).

122. Werte von $\varkappa$ bei kurzwelligen elektrischen Schwingungen.

Die Bestimmung von Dielektrizitätskonstanten trat auf Grund dieser Überlegungen in ein ganz neues Stadium, als die Versuchsanordnungen von H. HERTZ die Möglichkeit lieferte sehr rasche Schwingungen von etwa 10^6 bis 10^8 Perioden in der Sekunde zur Untersuchung zu verwenden, wodurch einerseits die Rückstandsbildung sehr eingeschränkt, andererseits auch der Einfluss von etwaiger Leitungsfähigkeit des Dielektrikums auf die Messresultate vermindert wurde. Die Bestimmung des „elektrischen Brechungsexponenten", wie die Quadratwurzel aus der Dielektrizitätskonstanten ($\sqrt{\varkappa}$) auf Grund der elektromagnetischen Lichttheorie nach MAXWELL-HERTZ jetzt vielfach bezeichnet wird, hat eine vielseitige Ausbildung erfahren, namentlich im Anschluss an die LECHERsche Anordnung (vgl. H. I, 2 in **204**) des Sekundärkreises bei den Resonanzschwingungen nach H. HERTZ. Eine Zusammenstellung und nähere Beschreibung dieser Methoden findet sich WIED. IV, 672 — 698. Hierbei geht man entweder von dem mehr optischen Gesichtspunkt aus, indem man einen Teil der Leitungen innerhalb der zu untersuchenden dielektrischen Flüssigkeit verlaufen lässt und die Verzögerung der längs der Drähte sich fortpflanzenden elektrischen Schwingungen auf der mit jenem Dielektrikum ausgefüllten Strecke in Beziehung bringt zu der Verzögerung auf der von Luft umgebenen Strecke (H. HERTZ, J. J. THOMSON, ARONS und RUBENS 1891, WIED. Ann. 44, 206, P. DRUDE 1895, WIED. Ann. 55, 633 und 1896, WIED. Ann. 58, 1); oder man ändert die schon bisher meist benutzte Methode der elektrischen Kapazitätsmessung in geeigneter Weise ab (THWING 1894 Z. f. ph. Ch. 14, 286; P. DRUDE 1897, Z. f. ph. Ch. 23, 267; ferner NERNST 1894, Z. f. ph. Ch. 14, 622). Die beiden letztgenannten Anordnungen zeichnen sich besonders durch einen geringen Bedarf an den zu untersuchenden Flüssigkeiten aus, sowie eine verhältnismässig bequeme Durchführung der Messung.

Von den Untersuchungsergebnissen verdienen folgende Punkte ein besonderes Interesse: Bei den erstgenannten Untersuchungsmethoden sind die Resultate andere, wenn die im zu untersuchenden Dielektrikum verlaufende Leiterstrecke in der Nähe eines Schwingungsbauches als wenn sie in der Nähe eines Knotens liegt; die letzteren Werte scheinen zuverlässiger, während im ersteren Fall ein Teil der elektromagnetischen Welle ausserhalb des Dielektrikums zu verlaufen scheint. Für die Theorie besonders wichtig sind die mehrfach beobachteten elektrischen Anomalien (P. DRUDE 1895 a. a. O.), nämlich die in einem gewissen Zusammenhang stehende anormale Dispersion und anormale Absorption. Unter anormaler Dispersion versteht man die Eigenschaft gewisser Flüssigkeiten für wachsende Schwingungszahlen (kürzere Wellenlängen) eine Abnahme des elektrischen Brechungsexponenten $n = \sqrt{\varkappa}$ zu zeigen, entgegen der gewöhnlich vorliegenden (normalen) optischen Dispersion, das ist wachsender optischer Brechungsexponent mit wachsender Schwingungszahl. So fand sich bei Glyzerin (vgl. WIED. IV, 692 und ETZ 97, 514) für folgende Schwingungszahlen ($\sim$) bezw. Wellenlängen (λ) in Luft

$\sim$	=	$25 . 10^6$	$150 . 10^6$	$400 . 10^6$	$3520 . 10^6$	$37\,500 . 10^6$	$75\,000 . 10^6$
λ	=	12 m	2 m	0·75 m	0·085 m	0·008 m	0·004 m
$\varkappa = n^2$	=	56·2	39·1	25·4	14·1	3·4	2·62

Es findet sonach eine stetige Annäherung an den optischen Brechungsexponenten (für rotes Licht $n^2 = 2{\cdot}1$) statt.

Nach Untersuchungen von LAMPA (vgl. ETZ 1897, 514) wäre diese anomale Dispersion bei den meisten Substanzen vorhanden, da für sehr kurze elektrische Wellen

$$\sim = 37\,500 \, . \, 10^6 \text{ bis } 75\,000 \, . \, 10^6 \; (\lambda = 8 \text{ bis } 4 \text{ mm})$$

sich folgende Werte für $\varkappa = n^2$ ergaben:

	$\lambda = 8$ mm	$\lambda = 6$ mm	$\lambda = 4$ mm
Paraffin	2·32	1·99	1·96
Ebonit	3·03	2·97	2·43
Schwefel . . .	3·24	4·03	4·00
Benzol	3·13	3·1	3·04
Glycerin	3·4	3·1	2·62
Terpentinöl . .	3·17	2·96	2·65
Alkohol abs. . .	6·76	5·25	5·20
Wasser	80·5	88·5	90·2

Die Absorption der elektrischen Wellen wächst im allgemeinen mit der elektrischen Leitfähigkeit einer Substanz, jedoch kommen auch hier Anomalien vor, welche nach DRUDE in einem gewissen Zusammenhang mit der vorstehend erwähnten zu stehen scheinen. So zeigt z. B. Glyzerin eine weit höhere Absorption als seiner Leitfähigkeit nach zu erwarten wäre, da sie bei Vergleich mit wässerigen $CuSO_4$-Lösungen wie eine Lösung von der auf Quecksilber bezogenen Leitfähigkeit $k = 34 \cdot 10^{-8}$ absorbiert.

Die Dielektrizitätskonstante wässriger elektrisch leitender Lösungen ist dieselbe wie die von reinem Wasser, welches keine ausgesprochene Änderung mit der Wellenzahl zeigt, sondern von geringen Schwingungszahlen bis hinauf zu $\sim = 400 \cdot 10^6$ und $t = 15^0\ C$ für $\varkappa = n^2$ angenähert den Wert 80 besitzt, wie folgende Tabelle (vgl. ETZ 1897, 514) zeigt:

Beobachter	$\sim$ pro Sekunde	$\varkappa = n^2$
Heerwagen	gering } zwischen	80·9
Nernst	„ } 10^1 u. 10^2	80·0
Thwing	$25 \cdot 10^6$	79·4
Cohn & Zeemann . . .	27 bis $97 \cdot 10^6$	79·4
Drude	$150 \cdot 10^6$	80·6
Drude	$400 \cdot 10^6$	81·76
Mazotto	147 bis $1154 \cdot 10^6$	81·00
Drude	$833 \cdot 10^6$	83·6
Cole	$6\,000 \cdot 10^6$	79·44
Lampa	$37\,500 \cdot 10^6$	80·45
Lampa	$50\,000 \cdot 10^6$	88·45
Lampa	$75\,000 \cdot 10^6$	90·23

Allerdings ist hierbei noch nicht der erhebliche Temperatureinfluss berücksichtigt.

Nach HEERWAGEN (1893, WIED. Ann. 49, 278) wäre die Abhängigkeit des elektrischen Brechungsexponenten n von der Temperatur t zwischen den Grenzen 0° und + 76° C durch die Gleichung

$$n^2 = \varkappa = 88{\cdot}23 - 0{\cdot}4044\, t + 0{\cdot}001035\, t^2$$

gegeben.

123. Werte von $\varkappa$ bei festen Stoffen und Einfluss der Ladedauer

Zusammenstellung der gemessenen Grenzwerte von Dielektrizitätskonstanten fester Stoffe ($\varkappa$ für Luft = 1 gesetzt).

	Stoff		Werte			Bemerkung
1.	Gewöhnliches Glas (8)	zwischen	3·243	und	8·45	nach Quincke sogar bis 25·0.
2.	Spiegelglas (3)	„	5·8	„	7·57	vgl. jedoch die Anmerk. auf der nächsten Seite.
3.	Crownglas [hart] (2)	„	3·243	„	6·96	
4.	Flintglas [sehr leicht bis sehr dicht] (3)	„	3·013	„	9·096	
5.	Wallrath (2)	„	2·18	„	2·25	
6.	Ebonit (6)	„	2·08	„	3·48	
7.	Schwefel (5)	„	1·78	„	3·90	
8.	Colophonium (1)	„	2·48	„	2 55	
9.	Schellack (4)	„	2·74	„	3·672	
10.	Paraffin (8)	„	1·78	„	2·32	vgl. jedoch die Anmerk. auf der nächsten Seite.
11.	Vulkanisierter Kautschuk (2)	„	2·497	„	2·94	
12.	Roher Kautschuck (2)	„	2·12	„	2·34	
13.	Glimmer (2)	„	6·64	„	10	
14.	Guttapercha (2)	„	2·464	„	3·3[1]	vgl. jedoch die Anmerk. auf der nächsten Seite.
15.	Chattertons Mischung (1)		2·547			
16.	Flussspat		6·7			
17.	Quarz		4·6			
18.	Kalkspat		7·6			
19.	Selen		10·2			
20.	Steinsalz		18			
21.	Eis bei — 23° C. (1)		78·8			$\varrho = 4{\cdot}4 \,.\, 10^9\, \Omega$
22.	Eis (nach Hopkinson und Wilson)	zwischen	3	und	90	(vgl. 124).

Temperaturkoeffizienten von $\varkappa$ wurden zuerst von CASSIE (vgl. Wk. IIIa, 78) bestimmt, welcher auf 1° C. Temperatursteigerung eine Zunahme von $\varkappa$ fand (vgl. die Formel in 121) und zwar für $\alpha_\varkappa \cdot 10^4$ etwa die Werte:

3	bei Glimmer	zwischen	15°	und	110° C.	
4	„ Ebonit	„	15°	„	60° „	
12	„ Glas I	„	15°	„	60° „	vgl. hierzu auch 124.
20	„ Glas II	„	15°	„	60° „	

1) Vgl. ETZ 92, 399.

Aus den Untersuchungen von THWING mit HERTZschen Schwingungszahlen seien zur Ergänzung folgende Werte von $\varkappa$ angeführt[1]):

Papier	2·82	Eis bei — 5°	2·85
Porzellan	4·20	Sand, gemischt mit Äther	7·43
Sandstein	6·2	Kupfersulfat mit Äther	5·46
Marmor	6·13	Kupferoxyd mit Alkohol	18·10
Gips	5·61	Eisenoxyd mit Äther	14·20
Eis bei — 2°	3·36	Bleioxyd mit Alkohol	25·90

Die grossen Unterschiede sind nur zum Teil auf Materialverschiedenheiten trotz der gleichen Benennung, zum grossen Teil auch auf die verschieden lange Ladedauer zurückzuführen, worauf im Anschluss an die Theorie von MAXWELL (vgl. **120**, **121**) namentlich BOLTZMANN hingewiesen hat. Mit Ausnahme einer gegensätzlichen Beobachtung (vgl. LECHER 1891, WIED. Ann. 42, 142), die sich vielleicht aus einem unbemerkt gebliebenen Versehen erklärt, wurde bei allen festen Materialien ausser Schwefel eine Verkleinerung von $\varkappa$ bezw. der Kapazität mit abnehmender Ladezeit gefunden. So z. B. von BOLTZMANN (1874, POGG. Ann. 151, 482 und 531) nach der Anziehungsmethode die folgenden Werte, denen unter K die an demselben Material von ihm mit der Kondensatormethode ermittelten Werte zum Vergleich angefügt sind:

Dielektrizitätskonstante $\varkappa$ (Luft = 1) für verschieden lange Ladedauer τ:

Zeit τ in Sekunden	$\left(\frac{1}{360} - \frac{1}{64}\right)$	0·9	1·8	45	K
Schwefel	3·90	—	3·66	3·70	3·84
Hartgummi	3·48	—	3·82	3·74	3·15
Paraffin	2·32	2·51	2·56	8·12	2·32
Kolophonium	2·48	3.63	4·23	5·28	2·55

Für noch kleinere Ladedauer (τ = 0·0006 Sekunden) fand SCHILLER (1874, POGG. Ann. 152, 555) mit einer von HELMHOLTZ angegebenen Methode der Kapazitätsvergleichung, die auf Bestimmung der Oscillationsdauer abhängig von der Kapazitätsgrösse beruht, folgende Werte, während daneben

1) Nach den Untersuchungen von HOOR (ETZ 1901, 719) wären noch folgende Werte bei Temperaturen von etwa 20° C. nachzutragen (vgl. Anmerkung zu **120**):

Crownglas	je nach $\frac{dV}{dn}$ ist $\varkappa$ zwischen	10·7 und	12·8
„ andere Sorte	„ „ „ „ „ „	6·92 „	7·22
Paraffin	„ „ „ „ „ „	3·24 „	3·68
Megohmit	„ „ „ „ „ „	5·09 „	5·31
Guttapercha	„ „ „ „ „ „	3·12 „	3·26
Kabelisoliermaterial	„ „ „ „ „ „	2·75 „	17·12

die Werte mit der Ladedauer $\tau = 0{\cdot}02$ Sekunden nach der von SIEMENS angegebenen Kondensatormethode (1857, POGG. Ann. 102, 91) beigefügt sind (vgl. Wk. IIIa, 75).

	$\tau = 0{\cdot}0006$	$\tau = 0{\cdot}02$
Hartgummi	2·21	2·76
Reiner Kautschuk (braun)	2·12	2·34
Vulkanisierter Kautschuk (grau)	2·69	2·94
Paraffin (durchsichtig)	1·68	1·92
Paraffin (milchweiss)	1·85	2·47
Halbweisses Glas	3·31	4·12
Weisses Spiegelglas	5·83	6·34

Endlich fand J. J. THOMSON 1889 (Proc. Roy. Soc. 46, 292), dass Glas, welches mit Stimmgabelunterbrecher, d. h. bei einer Ladedauer von einigen hundertstel Sekunden einen Wert $\varkappa$ zwischen 9 und 18 ergab, für HERTZsche Schwingungen von etwa $4 \cdot 10^{-8}$ Sekunden nur eine wirksame Kapazität zeigte, die $\varkappa = 2{\cdot}7$ entsprach.



124. Wirksame Kapazität und Vorstellung der Rückstandsbildung.

Untersuchungen des Verfassers (vgl. 1895, WIED. Ann. 54, 577), welche an verschiedenen Formen von technisch und namentlich auch für Messzwecke

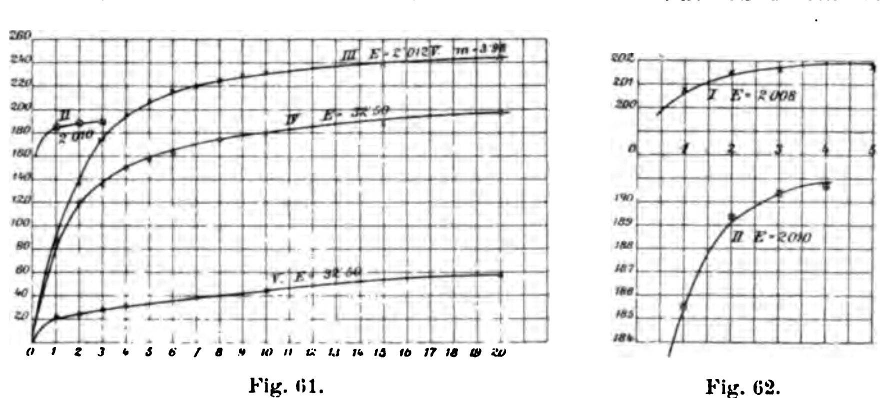


Fig. 61.

Fig. 62.

wichtigeren gemischten Dielektricis angestellt wurden, gaben graphisch dargestellt (Fig. 61 und 62) folgende Änderung der scheinbaren Dielektrizitätskonstanten bezw. der wirksamen Kapazität abhängig von der Ladedauer in Einheiten von etwa 0·00028 Sekunden, das ist der Länge der einzelnen Kontakte. Hierbei bezieht sich *I* auf einen Glimmerkondensator von CARPENTIER, *II* auf einen Paraffinpapierkondensator von CORTAILLOT, *III* auf einen technischen Pergamentpapierhochspannungskondensator in Öl von SWINBURNE, *IV* auf ein Bifilardrahtkondensator aus Manganindraht mit doppelter Baumwollenumspinnung, wie er in Widerstandssätzen Verwendung findet und daselbst auch häufig kleine resultierende Kapazitäten bei bifilaren Widerstandsrollen verursacht, *V* endlich auf einen Rollenkondensator mit Seidenumspinnung, bei welchem die Kapazität zwischen zwei Wicklungen besteht, die nach Art von Transformatorwicklungen übereinander liegen. Die Kurven in Fig. 61

und 62 lassen erkennen, wie die wirksame Kapazität (in Skalenteilen des Schwingungsgalvanometers als Ordinaten) bei den verschiedenen Kondensatorkonstruktionen ihr Verhältnis mit der Länge der Ladedauer (Abscissen) ändern. Der grosse Unterschied in dem Verhalten gegenüber kurzer Ladedauer ist unverkennbar. Während *I* eine sicher nachweisbare geringe Abnahme seines Kapazitätswertes erst bei Ladungen unter 0·003 Sekunden erkennen lässt und die Abnahme, wie aus Fig. 62 ersichtlich ist, bei einer Ladedauer von etwa 0·000 28 Sekunden erst 0·64 % des Wertes bei mehrsekundlicher Ladung beträgt, ist bei *II* die Abnahme schon merklicher und erreicht bei 0·000 28 Sekunden 3·5 % des Kapazitätswertes bei der Ladedauer von 1 Sekunde; bei einer Ladedauer von 0·002 Sekunden beträgt die Abnahme 1·83 %. Bei *IV* und noch mehr bei *III* und *V* erfolgt die Abnahme des Kapazitätswertes mit der Ladedauer sehr rasch, sodass gegenüber Dauerladung von einer oder mehreren Sekunden die wirksame Kapazität schon bei Ladezeiten von 0·002 Sekunden, bei *III* auf fast $^1/_3$, bei *V* sogar auf $^1/_{30}$ fällt[1]).

Im Anschluss an diese von der Ladezeit abhängigen Ladungskurven, welche man (als Hülfsvorstellung) der Verschiedenheit der dielektrischen molekularen Orientierungsfähigkeit (Polarisation) bei den einzelnen Materialien zuschreiben könnte, möge noch Erwähnung finden, dass der technische Hochspannungskondensator (No. III) mit der effektiven Wechselspannung $\tilde{E} = 1000$ Volt und $\omega = \pi \cdot z = 2\pi \sim = 400$ bearbeitet eine aus dem beobachteten Ladestrom $\tilde{J}$ in Amp. nach der Formel $C = \frac{\tilde{J}}{\omega \cdot \tilde{E}}$ bestimmte Kapazität von 3·36 Mf. zeigte, während bei Ladung mit Gleichspannung die mit der Ladedauer stark variierende Gleichspannungskapazität sich zu etwa 8 Mf. ergab. Geht schon aus den früheren physikalischen Messwerten (vgl. z. B. **123**) die Abhängigkeit von C bezw. $\varkappa$ von der Ladedauer hervor, auch wenn alle denkbaren Vorsichtsmassregeln getroffen werden, um für $\varkappa$ „reine" Werte zu erhalten, so scheint für praktische Zwecke die Berücksichtigung dieses Momentes auf die mit der Ladung Q bezw. bei Wechselstrom mit der Ladestromstärke $\tilde{J}$ proportionalen Werte von C und $\varkappa$ unerlässlich. Es dürfte deshalb auch hier in der Technik am besten sein dem allgemeinen und praktisch nicht ausreichend bestimmten Begriff der „Kapazität" denjenigen der wirksamen Kapazität (vgl. ETZ 1897, 62) entgegenzustellen oder besser als genauere Charakterisierung dieses Leitungskoeffizienten für bestimmte Betriebsverhältnisse anzufügen, um die verschiedenen auf C und $\varkappa$ einwirkenden Momente für den praktischen Gebrauch zusammenzufassen. Dass die oben beobachtete Verkleinerung der wirksamen Wechselspannungskapazität mit hoher Spannung auf weniger als die Hälfte von der Gleichspannungskapazität mit niederer Spannung nicht durch mangelhafte Isolation verursacht sein kann, geht aus der einfachen Überlegung hervor, dass mangelhafte Isolation den Wert von $\tilde{J}$ und damit die Kapazität scheinbar vergrössern aber nicht verkleinern würde; auch die in **126** zu behandelnden

---

1) Siehe als Ergänzung hierzu auch die von Hoor (ETZ 1901, 750 sowie auch 781 und ff.) an Glas- und Megohmitkondensatoren aufgenommenen Nachladekurven, Untersuchungen, welche an den Materialien mit relativ langdauernden „viskosen" Erscheinungen sich von 10 Sekunden an aufwärts, d. h. auf das Ende der Ladung erstrecken, während die obigen Untersuchungen die allerersten Ladestadien zur Darstellung bringen.

dielektrischen Energieverluste würden entsprechend den Verhältnissen der magnetischen Hysterese beim Transformator den Wert von $\tilde{J}$ durch Hinzufügung einer arbeitleistenden Komponente nur vergrössern, aber nicht verkleinern können.

Die obige Hülfsvorstellung der bei verschiedenen Dielektricis verschieden raschen molekularen Orientierungsfähigkeit bei der dielektrischen Polarisation findet eine gewisse Unterstützung in dem Untersuchungsergebnis, wonach die Ladung nicht nur von der Gesamtzeit, sondern auch von der Verteilung der Teilzeiten, d. h. den Zwischenpausen zwischen den einzelnen Kontakten (Zeitelementen der Ladung) abhängt. Dieses tropfenweise Laden ist bedeutend wirkungsvoller als eine ebenso lange zusammenhängende Dauerladung, indem bei *III* und *IV* die durch jenes erzielte disponible Ladung mehr als das Doppelte der letzteren beträgt. Die Rückstandsbildung kann hierbei nicht die Ursache bilden, da sie ja nur im entgegengesetzten Sinne wirken könnte, indem bei den im ersten Falle vorhandenen Zwischenpausen die Rückstandsbildung grösser, die disponible Ladung also kleiner sein musste als im zweiten. Wenn nichtsdestoweniger die Ladung so bedeutend grösser ist, so kann nur der Charakter der tropfenweisen Ladung die Ursache sein, die im Sinne der obigen Hülfsvorstellung wohl wie folgt zu deuten wäre: einmal wird das wiederholte Verbinden und Lösen zwischen Kondensator und Stromquelle wie eine elektrische Erschütterung wirken und ähnlich wie die mechanische Erschütterung die Magnetisierung, so die elektrische die Elektrisierung unterstützen können; ein zweites Mal wird das Richten der Moleküle des Dielektrikums eine gewisse Zeit beanspruchen und im ersteren Fall würde bei den relativ grossen Zwischenpausen zwischen den Impulsen die Wirkung der einzelnen viel grösser sein, als die der gleichlangen Antriebe inmitten einer Dauerladung. Wahrscheinlich aber dürfte beides zusammen die Wirkung einer mehrmaligen tropfenweisen Ladung so bedeutend diejenige einer gleichlangen Dauerladung überwiegen lassen (vgl. HEINKE 1895, WIED. Ann. 54, 602).

Aufs Engste wird die Erscheinung der Abnahme des wirksamen Wertes von C wohl mit derjenigen des sogenannten Rückstandes (vgl. 125) verknüpft sein. Hierfür sprechen namentlich Untersuchungen von J. HOPKINSON und E. WILSON (1897, Phil. Trans. London 189, 109—136; vgl. auch ETZ 1897, 583). Auf Grund der gemessenen Werte setzen dieselben die Gesamtkapazität C aus drei Gliedern zusammen, nämlich der sogenannten augenblicklichen Kapazität (C_0), der rückständigen Ladung $\left(\int_0^\tau \frac{1}{c}\, d\tau\right)$, welche in hohem Grade von der Temperatur und der Ladedauer abhängt, und drittens der in Abzug zu bringenden gewöhnlichen Leitung, sodass für die Zeit τ der Ausdruck für die Gesamtkapazität zu

$$C = C_0 + \int_0^\tau \frac{1}{c}\, d\tau - \frac{1}{c_x} \tau$$

gesetzt wird.

Nach den Messungen an einer Natronkalkglasflasche ergab sich ein sehr grosser (nicht linearer) Temperaturkoeffizient für C, da für 72 sekundliche Perioden und 70 Volt Spannung die scheinbare Kapazität auf diejenige bei 15° C. als Einheit bezogen, folgende Werte lieferte (vgl. ETZ 1897, 585):

Temperatur in Celsiusgraden	=	15	92	117	154
Gesamtkapazität C	=	1	1·31	1·66	2·6

woraus ein Anwachsen der Dielektrizitätskonstanten $\varkappa$ des Glases von etwa 8 auf nahezu 21 folgen würde (vgl. hierzu die Tabelle in **123**).

Der grosse Einfluss der Frequenz bei höheren Temperaturen folgt aus den bei 120° C. erhaltenen Werten:

Periodenzahl (Frequenz)	=	7·3	12	39·5	71·5	100
Gesamtkapazität C . . .	=	1·27	1·11	0·87	0·78	0·75

Da einerseits bei sehr hohen Frequenzzahlen der Einfluss der Temperatur ein sehr kleiner war und z. B. bei $2 \cdot 10^6$ sekundlichen Perioden für das Temperaturintervall 127° — 25·5° C. nur noch 7% betrug, hingegen bei 8400 ~ bereits auf etwa 19% wuchs, andererseits die rückständige Ladung sich in hohem Grade von der Temperatur abhängig zeigte (vgl. **125**), so wird der Schluss gezogen, „dass die scheinbar grosse Kapazität dieses Glases bei einer Temperatur von 120° bis 170° von der rückständigen Ladung herrührt, dass jedoch deren Wirkungen nicht viel zu bemerken sind, wenn die Frequenz über 10 000 beträgt.“ In gleicher Weise wird das stark veränderliche $\varkappa$ des Eises erklärt, dessen „augenblicklicher Wert“ ($\varkappa_0$) bei $2 \cdot 10^6$ ~ zu etwa 3 gefunden wurde, während für einige tausendstel Sekunden Ladedauer und für — 18° aus der obigen Formel der Gesamtkapazität der nahezu dreissigfache Wert für $\varkappa$ folgen würde (vgl. Tabelle in **123**, sowie auch $a_\varkappa$ in **121** bezw. Ph. Z. II, 43).

Von den Versuchen die Dielektrizitätskonstante mit anderen Materialeigenschaften in Verbindung zu bringen (vgl. u. a. auch Obach. ETZ 92, 218), sei die von A. Coehn (1898, Wied. Ann. 64, 217) ausgesprochene Vermutung erwähnt, dass die Ordnung der Stoffe nach der Spannungsreihe bei Reibung oder Berührung zweier Materialien zugleich die Ordnung der Dielektrizitätskonstanten angiebt, insofern Stoffe mit höherem $\varkappa$ sich positiv laden bei der Berührung mit solchen von kleinerem $\varkappa$, wonach sich u. a. auch erklären würde, dass alle Körper gegen Wasser negativ werden (vgl. **80** und **82**).

b) Rückstand und Energieverluste im Dielektrikum.

125. Rückstandsbildung bei geladenem Dielektrikum.

Als Rückstand pflegt man die schon sehr frühzeitig, zuerst an den Leydener Flaschen beobachtete Erscheinung (siehe **3**) zu bezeichnen, dass die einem Kondensator mit festem oder festflüssigem Dielektrikum mitgeteilte Ladung nicht im vollen Betrage auf einmal bei Vornahme der Entladung disponibel ist und deshalb auch nicht durch eine Entladung von beschränkter Dauer abgeführt werden kann, sondern dass der Kondensator nach einer zum Ausgleich unter anderen Umständen längst ausreichenden Entladung mit nachfolgender Isolierung gleichsam von selbst wieder zwischen seinen Belegungen eine mit der Zeit steigende Spannung annimmt, welche zwar kleiner als die Ladespannung ist, aber mit der primären oder Hauptladung im Vorzeichen übereinstimmt.

Während die Gesetze, welche die quantitativen Verhältnisse dieser Erscheinung angeben, im wesentlichen als bekannt angesehen werden können, ist eine völlig befriedigende „Erklärung“ in qualitativer Hinsicht noch nicht

gefunden, da es noch gar nicht einmal sicher ist, ob diese Erscheinung der „dielektrischen Nachwirkung“ rein elektrophysikalischer Natur ist oder vielleicht auf eine elektrochemische Einwirkung zurückzuführen ist (vgl. unten). Dass die vielfach benutzten und sich atomistisch bequem darbietenden Bilder oder Vorstellungen vom Eindringen oder Hineinkriechen der Elektrizität in das Dielektrikum oder vom Verschlucken (Absorbieren) derselben durch das letztere u. s. f., sowie das darauf folgende Wiederhervortreten eine tiefer gehende Erklärung nicht zu ersetzen vermögen, braucht nur angedeutet zu werden. Von den elektrophysikalischen Theorien der Rückstandserscheinung (vgl. WIED. II, 161 u. ff.) dürfte diejenige von MAXWELL mit den Thatsachen am besten in Einklang stehen. Die einem Kondensator zugeführte Ladung zerfällt — abgesehen von der wegen mangelnder Isolation des Dielektrikums das letztere nach Art eines Leiters völlig durchsetzenden und den Ladungscharakter völlig verlierenden Elektrizitätsmenge — nach dem Obigen in die durch Entladung sofort abführbare disponible Ladung und den erst nach Entfernung dieser primären oder Hauptladung hervortretenden Rückstand. Eine durch Messung nicht nachweisbare, also erst recht praktisch unmerkliche Rückstandsbildung weisen alle Gase, vor allem Luft, auf, weshalb auch als Normalkondensatoren mit eindeutigem Kapazitätswert in erster Linie Luftkondensatoren zu gelten haben. Nach den bisherigen Untersuchungen sind ferner rückstandsfrei alle völlig homogenen Dielektrika flüssiger und fester Natur, eine Thatsache, welche zu gunsten der von MAXWELL über den Rückstand aufgestellten Theorie spricht (vgl. die Formel in **121**), aber nur bei der allersorgfältigsten Reinigung und Behandlung des verwendeten Dielektrikums zutrifft (vgl. HERTZ 1883, WIED. Ann. 20, 279; ARONS 1888, WIED. Ann. 35, 291; MURAOKA 1890, WIED. Ann. 40, 328).

Sehr geringen und praktisch oft zu vernachlässigenden Rückstand zeigt guter Glimmer (vgl. WIED. II, 124, Untersuchungen von BOUTY).

Erheblich dagegen ist die Rückstandsbildung bei allen gemischt geschichteten Dielektricis, wenn dieselben auch jedes für sich wenig oder keinen Rückstand zeigen (vgl. MURAOKO a. a. O.), was nach MAXWELLS Theorie durch ein verschiedenes Verhältnis zwischen Dielektrizitätskonstante und der stets vorhandenen Spur von Leitungsfähigkeit bei den einzelnen Schichten erklärt wird, d. h. der Glieder $C\frac{dE}{dt}$ und $\frac{E}{R}$ in MAXWELLS Gleichung.

Eine sehr sorgfältige Untersuchung über das Verhalten und namentlich die Rückstandsbildung bei Guttapercha hat H. BEHN-ESCHENBURG (vgl. ETZ 92, 399 und 411) an einem 2 km langen Kabel angestellt. Die wesentlichen Ergebnisse stimmen mit den unten angegebenen überein.

Die wichtigeren Gesetze, welche in nahezu gleicher Weise für die Nachladeerscheinungen wie für die Rückstandsbildung gelten, mögen wieder für die obengenannten fünf praktisch wichtigeren Kondensatorformen (vgl. in **123** bei Fig. 61 und 62) an der Hand der graphisch dargestellten Untersuchungsergebnisse angegeben werden; eine Übereinstimmung mit den Untersuchungen anderer Forscher (vgl. WIED. II, 150 ff.) ist im wesentlichen vorhanden, nur zeigt sich, wie zu erwarten, dass die Formen mit nicht vollkommener Isolierung um so mehr hinter den genauen Rückstandsgesetzen zurückbleiben je grösser der Verlust durch innere Entladung ist.

Der Verlust an disponibler Ladung (durch Isolation und Rückstand) nach einer Ladung mit $E = 2{\cdot}008$ Volt ist für I, II und III abhängig von

der Zeit des geladen Stehenbleibens in Sekunden in Fig. 63 dargestellt, der prozentuale Verlust innerhalb einer Minute den Kurven beigefügt.

Setzt man gleiche und wegen der Überlagerung aller Rückstandsbildungen (vgl. unter 2) bis zum Eintritt stationärer Verhältnisse fortgesetzte Ladungs- und Entladungsverhältnisse voraus, z. B. wie hier Ladung der Belegungen während einer Minute, hierauffolgender Kurzschluss zum Zweck der Abführung der disponiblen Ladung in der Dauer von 15 Sekunden und hierauffolgende Messung des wieder hervortretenden Rückstandes, so hat man bei der Rückstandsbildung die in gleichen Zeitabständen, z. B. eine Minute aufeinander folgenden Einzelwerte zu unterscheiden von dem Summenwert innerhalb längerer Zeit, sowie weiterhin von der Geschwindigkeit der Rückstandsbildung, wenn man den Quotienten $\frac{\text{gebildeter Rückstand}}{\text{Zeit}}$ aufträgt. In quantitativer Hinsicht lassen sich die Gesetze der Rückstandsbildung in folgender Weise aussprechen:

1) Unter sonst gleichen Umständen nimmt die Grösse des Rückstandes sowohl in ihren Einzel- als Summenwerten direkt proportional mit der Grösse der zur Ladung verwendeten Spannung zu, wenigstens bei gut isolierenden Dielektricis, andernfalls erfolgt die Zunahme wegen innerer Entladung langsamer.

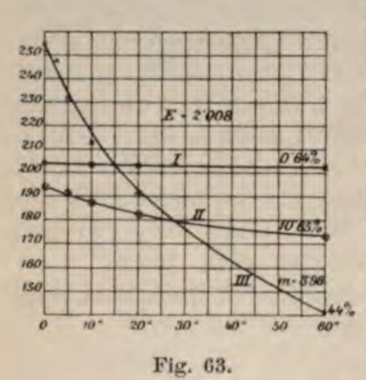


Fig. 63.

2) Sowohl bei einseitigen Ladevorgängen als auch bei Wechsel der Laderichtung lagern sich die Rückstandsbildungen übereinander, sodass ein längere Zeit in einer Richtung geladener Kondensator nach entgegengesetztem Laden von kürzerer Dauer zuerst abnehmende Rückstandsbildungen in dem letzteren Sinne zeigt, welche jedoch durch Null hindurch nach längerer Zeit in Rückstandsbildungen der ersten Richtung übergehen.

3) Die an die Oberfläche zurücktretende und durch Entladung am Galvanometer nachweisbare Rückstandsbildung ist eine Funktion der Zeit und zeigt bei graphischer Auftragung, mit der Zeit als Abscisse, hyperbelartigen Verlauf. Zu einer bestimmten Zeit ist sonach unter gleichen Lade- und Entladeverhältnissen die Grösse der Rückstandsbildung dieselbe und **unabhängig** davon, ob und wie lange der Kondensator in der Zwischenzeit kurzgeschlossen war, oder anders ausgedrückt, der Summenrückstand für eine bestimmte Zeit ist unter sonst gleichen Verhältnissen (Temperatur) eine Konstante. Es betrug z. B. dieser so innerhalb vier Minuten gebildete Summenrückstand unter den oben erwähnten gleichen Verhältnissen auf die disponible Ladung bei sofortiger Entladung bezogen:

bei Kondensator:	I	II	III	IV	V
Rückstand in $^0/_0$ =	0·9	10·5	36·8	46·2	85·5

Bei den letzten drei Kondensatoren war die Rückstandsbildung so stark, dass für einige Zeit ein nicht unbeträchtlicher Dauerstrom nach Entfernung der ersten disponiblen Ladung dem Kondensator entströmt, ähnlich der Erscheinung an unterseeischen Kabeln. Diese verschiedenen Grade der Rückstandsbildung, welche allmählich zunehmen, bis sie im letzten Fall stark an

die Entladung eines vorher geladenen Sekundärelementes erinnerten, haben dem Verfasser die Vermutung nahegelegt (vgl. HEINKE, WIED. Ann. 54, 590), ob der ganze Vorgang der Rückstandsbildung nicht etwa chemischer Natur ist, insofern eine vorhandene elektrische Druckdifferenz eine Verschiebung zwischen den heterogenen (vgl. oben) Dielektrikumsmolekülen bedingt, welche mit einer Bindung von freier Elektrizität verknüpft ist. Bei Aufhören der Ladespannung würde auch der Rückgang der chemischen Änderung und das Wiederfreiwerden der Elektrizität eintreten, jedoch würde der letztere Vorgang ebenso wie die Bindung eine gewisse Zeit beanspruchen. Jeder Kondensator mit Rückstandsbildung würde sonach eine, wenn auch für gewöhnlich sehr kleine Akkumulatorwirkung haben, ebenso wie jeder Akkumulator eine geringe Kondensatorwirkung. [1])

4) Nach den Untersuchungen von J. HOPKINSON und E. WILSON (vgl. 124) wäre die Rückstandsbildung in hohem Grade von der Temperatur abhängig, so zwar, dass dieselbe mit der Temperatur anwächst, ein Maximum erreicht und bei weiterer Temperatursteigerung wieder abnimmt. Der Gang der Rückstandsbildung einerseits mit der Zeit τ in Sekunden, welche seit der Entladung der durch zwei Minuten langen Anschluss an 1250 Volt erhaltenen disponiblen Ladung verflossen ist, andererseits in ihrer Abhängigkeit von der Temperatur t, die durch Heizung eines Säure- bezw. Ölbades variiert wurde, geht aus folgender Beobachtungstabelle hervor (vgl. ETZ 1897, 584); die Skalenteile geben ein relatives Mass für die Grösse des zwischen je zwei Ablesungen gebildeten Rückstandes:

τ in Sekunden	t in Celsiusgraden						
	15	34·5	54·5	70	85	117	132° C.
10	246	—	—	—	—	9770	7256
15	—	376	1176	2785	5445	—	—
20	121	265	1030	2586	4100	3590	3010
30	87	209	892	2070	2980	2150	1735
60	46	131	683	1320	1510	950	778
120	22·5	91	483	720	688	440	350
300	9·3	62	256	260	210	164	107
600	—	—	123	110	—	86	< 59

Die Rückstandsbildung stellt vom energetischen Standpunkt aus das scheinbare, wenn auch vorübergehende Verschwinden einer Elektrizitätsmenge unter Spannung dar. Diese momentan nicht mehr disponible elektrische Energie ist also von dem Dielektrikum **absorbiert** und muss entweder im Innern als noch in elektrischer Energieform bestehend angenommen werden oder als in eine oder mehrere andere Energieformen übergeführt. Nach dem vom Verfasser oben vermutungsweise als elektrochemisch angesprochenen Cha-

1) Wie ich nachträglich finde, hat auch MAXWELL (vgl. Tr. I, 330) schon eine Andeutung nach dieser Richtung hin gemacht.

rakter der Rückstandserscheinung würde man sich vorzustellen haben, dass die Rückstandsenergie — abzüglich der zur Elektrisierung verbrauchten und in Wärme übergeführten dielektrischen Energieverluste (vgl. **126**) — in chemische Energieform übergeführt wird, etwa ähnlich wie bei der Akkumulatorladung. Beim Wiederhervortreten, welches der Entladung entsprechen würde, wird jene chemische Rückstandsenergie nach Abzug der Umelektrisierungsarbeit wieder in elektrische zurückverwandelt. Hiernach würde also zweimal ein Energiebetrag durch die Umelektrisierungsverluste als nicht umkehrbar in die tiefere Energieform der Wärme herabsinken, wobei die Energieverluste namentlich durch gasige Zwischenschichten (Luft) erhöht zu werden scheinen.

Auf die grosse praktische Bedeutung der Rückstandserscheinung bei Kabeln, namentlich der Telephonie und Telegraphie, wegen ihres Zusammenhanges mit den Energieverlusten im Kabel und dadurch dem Übertragungsvermögen (siehe hierzu auch H. I, 2) scheint zuerst Preece (vgl. ETZ 1892, 492) auf Grund von Vergleichen sogenannter künstlicher Kabel hingewiesen zu haben. Auch ein Zusammenhang zwischen effektiver Kapazität und Absorption im Dielektrikum lässt sich hieraus ableiten.

126. Energieverluste im Dielektrikum.

Die Erscheinung des Energieverbrauchs durch Umelektrisierung (dielektrische Hysterese) ist noch verhältnismässig wenig untersucht, ja es kann den Anschein haben, als ob es noch nicht einmal feststünde, ob der zuverlässig beobachtete und gemessene Energieverlust in festen und die Erscheinung des Rückstandes zeigenden Dielektricis wirklich als Umelektrisierungsarbeit aufzufassen ist, da von anderer Seite (vgl. ETZ 1899, 149) die beobachtete Erwärmung sowie der gemessene Leistungsverlust, welcher bei derartigen Kondensatoren, z. B. Hochspannungskabeln oder Hochspannungskondensatoren, bei Bearbeitung mit Wechselstrom auftritt, als Joulesche Wärme bezw. Verlust $\left(J^2 \cdot R = \frac{E^2}{R}\right)$ des die Isolierung nach dem Ohmschen Gesetze durchsetzenden Stromes aufgefasst wird. Diese Auffassung kann aber wohl als widerlegt gelten, wenn man bedenkt, dass der für diese Erklärung erforderliche Isolationswiderstand R viel kleiner, ja von ganz anderer Grössenordnung sein müsste als die erfahrungsgemäss bei Kabeln oder anderen Kondensatoren vorhandenen Werte, um die gemessenen Energieverluste zu erklären. Direkt gegen diese Auffassung und für einen Umelektrisierungsverlust (dielektrische Hysterese) nach Art des bei elastischen Deformationen auftretenden Verlustes, oder, für den Elektrotechniker geläufiger, des Ummagnetisierungsverlustes (magnetischer Hysterese) dürfte der Umstand sprechen, dass der Verlust nicht bei Gleichspannung, sondern nur bei Wechselspannung beobachtet worden ist und nach den schon von W. Siemens (1864, Pogg. Ann. 125, 137 bezw. Wiss. Arb. I, 182) ausgeführten Untersuchungen nahe proportional der Zahl der Ladungen, d. i. der Periodenzahl, gefunden wurde. Weitere Untersuchungen nach dieser Richtung an festen Dielektricis von Kleiner (1893, Wied. Ann. 50, 138 bezw. ETZ, 542) ausgeführt, ergaben bei Paraffin und Kolophonium „die durch dielektrische Polarisation erzeugte Wärme“ als nicht nachweisbar, hingegen bei Glimmer (0·28), Wachs (0·6), Glas (0·74), Guttapercha (0·76) und Kautschuk (1·41) im Verhältnis der eingeklammerten Zahlen als vorhanden.

Untersuchungen von Naccari und Bellati (1882, vgl. Wied. II, 127) stellten das Vorhandensein der Umelektrisierungsarbeit auch für Flüssigkeiten

fest und zeigten, dass dieselbe bei Petroleum grösser ist als bei Wasser. Der als Kriterium angeführte Versuch mit zwei Apparaten von verschieden grossen Belegungen, welcher gegen die Auffassung der Verluste als JOULEscher entscheiden soll, ist allerdings nicht stichhaltig, sondern beruht auf einem Versehen im Schluss, da nach beiden Auffassungen die beobachtete grössere Erwärmung bei den grossen Belegungen auftreten musste $\left(\text{vgl. oben } \frac{E^2}{R}\right)$.

Untersuchungen von BERGMANN (1886, vgl. WIED. II, 128) wiesen auf eine Zunahme des Verlustes ungefähr proportional mit dem Quadrat der Spannung E hin. Dieselbe Abhängigkeit von der Spannung fand STEINMETZ (vgl. ETZ 1892, 227 sowie 1895, 623, endlich auch 1901, 605) und SAHULKA (vgl. ETZ 1893, 739). Messungen des Verfassers an dem in **124** als No. III erwähnten Hochspannungskondensator von SWINBURNE bei Gelegenheit der Untersuchung von Resonanzerscheinungen lieferten einmal eine für die Untersuchung dieser dielektrischen Verluste besonders günstige Wattmetermethode (vgl. ETZ 1897, 63, Fig. 14 ferner 1899, 200), sowie ein zweites Mal die absoluten

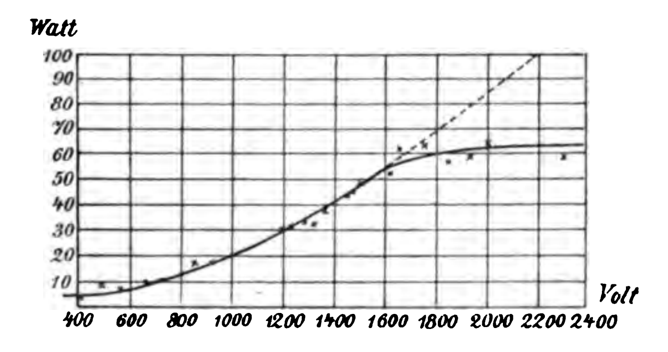


Fig. 64.

Verluste des benutzten Hochspannungskondensators (wirksame Kapazität 3·36 Mf) in Watt, deren Abhängigkeit von der Spannung graphisch in Fig. 64 dargestellt ist und bis zu etwa dem 1·5 fachen der normalen Beanspruchung (1000 Volt) dem quadratischen Gesetz folgte. Die im vorliegenden Fall bei etwa 1700 Volt beobachtete Umbiegung der Kurve, welche nachträglich als Nebenresultat aus den Resonanzwerten ermittelt wurde, bedarf allerdings noch der weiteren Bestätigung, weil bei der benutzten Differenzmessung die im Kondensator verbrauchte Leistung P_c aus der gemessenen Gesamtleistung P des auf Spannungsresonanz geschalteten Aggregates von Kondensator und Selbstinduktion und aus dem Eigenverbrauch P_S der Selbstinduktion (Hochspannungswicklung eines Igeltransformators) zu

$$P_c = P - P_S$$

bestimmt wurde und bei P_S die Eisenverluste oberhalb 1500 Volt durch Extrapolation nach der Formel von STEINMETZ eingesetzt wurden. Sollte diese bei Überanstrengung eines Dielektrikums (der obige Kondensator war für normal 1000 Volt gebaut) beobachtete Sättigungserscheinung aber noch anderweitig beobachtet werden, so würde dies für eine Vervollständigung

der Analogie zwischen den magnetischen und dielektrischen Reibungserscheinungen sprechen.[1])

Der Versuch, die dielektrische Hysterese aus dem Zuwachs der Dämpfung zu bestimmen, welche ein Ellipsoid des zu untersuchenden Dielektrikums erfährt, wenn man es in einem homogenen elektrostatischen Felde schwingen lässt, gegenüber der Dämpfung bei der Feldstärke Null, ist von W. SCHAUFELBERGER (vgl. ETZ 1899, 223) gemacht worden. Von den beiden untersuchten Materialien wird für das Verhältnis: Verlust infolge dielektrischer Hysterese zu der gesamten zur Ladung verwendeten (dielektrischen Spannungs-)Energie bei reinem Paraffin der Wert 2·2 $^0/_0$, bei Hartgummi 63·5 $^0/_0$ angegeben. Inwieweit diese indirekte Bestimmungsmethode verwendbar ist und mit der unmittelbaren Verlustbestimmung vergleichbare Resultate liefert, bedarf aber noch der näheren Untersuchung. Diese scheint um so notwendiger, als andererseits die Änderung der Dämpfung im elektrischen gegenüber dem unelektrischen Felde von QUINCKE (1897, WIED. Ann. 62, 1) dazu benutzt worden ist, um die Änderung der „Klebrigkeit" isolierender Flüssigkeiten zu bestimmen, wobei er zu dem Schluss gelangte, dass die „elektrische Klebrigkeit" etwa proportional mit der Dielektrizitätskonstanten $\varkappa$ und der elektrischen Felddichte zunimmt.

Die Untersuchung dielektrischer Hysterese ist auch mit Hülfe von elektrischen Drehfeldern, d. h. zwei räumlich um 90^0 versetzten elektrischen Wechselfeldern mit Phasenverschiebung durchgeführt worden (vgl. ARNO, ETZ 1893, 17). In ganz analoger Weise, wie durch zwei entsprechende Magnetfelder die Bildung eines magnetischen Drehfeldes sich ergiebt (vgl. **34** sowie H. I, 2), erfolgt durch jene die Bildung eines Drehfeldes aus elektrischen Kraftlinien, wobei das resultierende elektrische Feld von angenähert konstanter Stärke mit seiner Achse rotiert. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen, nach welchen die dielektrische Hysterese nicht proportional dem Quadrat der Feldstärke bezw. Spannung zunehmen würde, sondern wie die magnetische mit der Potenz 1·6, bedürfen aber nach den neueren Untersuchungen von HEYDWEILER über Bewegung von Körpern im elektrischen Feld (1899, WIED. Ann. 69, 521) noch näherer Prüfung, da hierbei noch andere Bewegungserscheinungen und -antriebe ins Spiel kommen (vgl. hierzu **137**). Diese Erscheinungen dürften auch die Ergebnisse von SCHAUFELBERGER beeinflussen.

An Kabelnetzen sind bisher quantitativ brauchbare Messungen über dielektrische Hysterese noch nicht ausgeführt oder wenigstens nicht veröffentlicht worden; noch weniger sind vorläufig auf diese Verluste bezügliche dielektrische Materialkoeffizienten (etwa nach Art der magnetischen Hysteresiskoeffizienten auf Volumen bezw. Gewicht der verschiedenen Dielektrika bezogen) angebbar. Dieser hauptsächlich auf die bisherigen Messschwierigkeiten der hierher gehörigen Erscheinungen zurückzuführende Mangel eröffnet der Forschung noch grosse, kaum bebaute Gebiete, deren Erschliessung vielleicht den Zusammenhang zwischen den elektrischen und optischen oder allgemeiner den Strahlungserscheinungen sowie den zwischen denselben bestehenden energetischen Verhältnissen zu vervollständigen, wenn nicht überhaupt erst aufzufinden berufen ist. Dass elektrischer Rückstand, Umelektrisierungsverluste

---

1) Auf diese tiefgehende Analogie hat auch neuerdings wieder VON HOOR (vgl. ETZ 1901, 784) auf Grund seiner Untersuchungen hingewiesen.

und Absorptionsvermögen bezw. Durchlässigkeit gegen elektromagnetische Wellen in einem gewissen, gegenwärtig noch unbekannten Zusammenhang stehen, besitzt aber Wahrscheinlichkeit.[1])

c) Dielektrische Festigkeit und Dichtigkeit.

197. Mechanische Hülfsvorstellungen

Fasst man jedes Dielektrikum als die zwei oder mehr Leiter trennende Scheidewand auf, deren Hauptaufgabe darin besteht, einen unangebrachten elektrischen Ausgleich örtlich zu verhindern, indem sie der zwischen den beiden Seiten bestehenden elektrischen Druckdifferenz (Spannung) widersteht, so liegt es technisch ausserordentlich nahe, diese elektrische Beanspruchung des Dielektrikums mit mechanischen Materialbeanspruchungen zu analogisieren und die vertrauteren, weil älteren und in der geistigen Entwickelung gewöhnlich vorausgegangenen Begriffe der Mechanik möglichst auf die elektrischen Erscheinungen zu übertragen. Dass die massvolle Benutzung derartiger Analogien einen grossen gedankenökonomischen und sonach wissenschaftlichen Wert besitzt, wurde bereits früher betont (vgl. 53), nur darf man die Thatsache, dass es sich bei allen derartigen Vergleichen um mehr oder weniger beschränkte Analogien handelt, natürlich nicht aus dem Auge verlieren.

Von dem mechanisch-elektrischen Standpunkt würde man die Dielektrika sonach einmal auf ihren Widerstand hin gegen Bruch (Zerreissen bezw. Durchschlagenwerden u. s. f.) durch elektrische Spannung zu betrachten haben, ein zweites Mal auf ihre Dichtigkeit oder gleichsam elektrische Porosität hin, insofern eine Art Durchsickern von Elektrizität zugelassen wird. Beide Erscheinungen werden also bereits Grenzgebiete behandeln, welche zu den elektrischen Ausgleicherscheinungen hinüberleiten. Unter Benutzung einer Flüssigkeits-Hülfsvorstellung könnte man sich sonach das Verhalten der dielektrischen Scheidewand durch eine feste Wand analogisieren (vgl. 109), welche unter Flüssigkeitsdruck steht und deren abgrenzende Festigkeit der Wirklichkeit entsprechend nach drei Richtungen hin beschränkt ist. Die hydraulisch beanspruchte „feste“ Wand wird einmal eine elastische Verschiebung bezw. Durchbiegung erfahren, ein zweites Mal bei hinreichender Druckdifferenz und je nach dem verschiedenen Grade der Porosität des Materials ein Durchsickern der Flüssigkeit zulassen, ein drittes Mal endlich bei immer weitergehender Steigerung der Druckdifferenz eine Zertrümmerung in Gestalt einer Durchbrechung oder Zerreissung erfahren mit nachfolgender intensiver Ausgleicherscheinung, welche quantitativ und in ihrer Zeitdauer von der [illegible] u. s. w. abhängen wird. Die durch elektrische Spannung [illegible] Dielektrika [illegible] Erscheinungen: abgesehen [illegible]

---

1) Einen [illegible] in ihrem Zusammenhang [illegible] wiederum die [illegible]

Aus neueren [illegible] eigens konstruierten „[illegible] würde hervorgehen [illegible] eigentlichen [illegible] nur mit einer [illegible]

Einfluss ausübenden Dimensionsverhältnissen wird der die erste Erscheinungsgruppe mechanisch bedingende Elastizitätsmodul elektrisch mit der Dielektrizitätskonstante, richtiger mit ihrem reziproken Wert, zu vergleichen sein; die mechanische, in allen beliebigen Graden denkbare Porosität oder die ihr reziproke Dichtigkeit bis zum praktisch undurchlässigen Material mit der elektrischen, gleichfalls in diesen weiten Grenzen vorhandenen Leit- bezw. reziproken Isolierfähigkeit; die mechanische Bruchfestigkeit bezw. Beanspruchung mit der elektrischen Durchschlagsfestigkeit bezw. Beanspruchung auf Spannung. Dass die mechanische Materialdurchbiegung gegenüber der Ausgangslage mit der dielektrischen Verschiebung gegenüber den unverschobenen materiellen Grenzflächen des Dielektrikums zu vergleichen ist, sei unter Hinweis auf die Hülfsvorstellungen hier nur nochmals erwähnt. Nach der vorausgegangenen Behandlung der Dielektrizitätskonstanten wäre also hier noch die dielektrische Festigkeit und Durchlässigkeit zu betrachten, soweit Grenzwerte in Frage kommen, da die Ausgleicherscheinungen selbst in II. I, 2 behandelt werden. Die weitaus umfangreichsten Untersuchungen sind in dieser Beziehung an gasförmigen Dielektricis und namentlich dem praktisch wichtigsten, der Luft, angestellt worden, während bezüglich der anderen Materialien weniger zuverlässige Beobachtungszahlen von allgemeinerer Bedeutung vorliegen. Seinen Grund hat dies in erster Linie wiederum in der Entwickelung der Elektrophysik, da bereits bei der Reibungselektrizität von jeher die „Schlagweite" eine wichtige Rolle spielte.

128. Dielektrische Festigkeit von Gasen.

Von vornherein ist von den vielen Schlagweitetabellen oder etwaigen Schlagweiteformeln nur dann eine gewisse Übereinstimmung zu erwarten, wenn die Beanspruchung der Zwischenschicht sowie deren Aufbau (innere Struktur) die nämlichen sind. Daher werden Umstände, welche die relative Festigkeit einer gleich dicken Schicht von anscheinend gleicher Beschaffenheit, z. B. Luft, von Atmosphärendruck beeinflussen, in erster Linie die Form der metallischen Grenzflächen bilden. Ob Platte, Kugel oder Spitze, oder genauer, welche Konvexität (Radius) die Grenzflächen gegenüber der elektrisch zu beanspruchenden Dielektrikumsschicht besitzen, wird sonach einen grossen Einfluss auf ihre elektrische Bruchfestigkeit ausüben, ähnlich wie mechanisch die Gestalt der beiderseits ein Material bearbeitenden oder auf Druck beanspruchenden Druckflächen von Einfluss auf den zum Bruch (Zerteilung) erforderlichen spezifischen Druck ist. Aber auch bei Benutzung gleicher Endflächen, z. B. Kugeln mit bestimmtem Radius, treten im gleichen Material, wofür zunächst stets Luft bei Atmosphärendruck angenommen sei, noch erhebliche Abweichungen in den gefundenen elektrischen Bruchspannungen (Schlagweiten bei gleicher Spannung) auf. Erklärt werden dieselben zum Teil nach den Untersuchungen von JAUMANN (1888, Wien. Sitz.-Ber. 97, 765) durch den Einfluss der Schnelligkeit in dem Anwachsen der elektrischen Spannung, so zwar, dass, je rascher das Anwachsen, um so geringer die zum Durchschlagen erforderliche Spannung. In einer späteren Arbeit über die „Inkonstanz der Funkenpotentiale" (vgl. ETZ 1895, 670) zieht JAUMANN interessante Parallelen zwischen den Bedingungen der Funkenentladungen und anderen „katastrophischen Vorgängen", wie den Siede- und Gefriererscheinungen, wobei er namentlich darauf hinweist, dass entsprechend den Verzögerungserscheinungen der letzteren auch bei Vermeidung der kleinsten Spannungsschwankung ungewöhnlich hohe Funkenpotentiale erhalten werden können.

In weiterer Verfolgung seiner Beobachtungen ist JAUMANN zu der bemerkenswerten Annahme geführt worden, dass die Kathodenstrahlen sowie voraussichtlich auch Röntgen-, Becquerel- u. dergl. Strahlen sehr kurzwellige longitudinale Schwingungen sind (vgl. 79), die auf nicht völlige Inkompressibilität der elektrischen Partikelchen im Dielektrikum (vgl. 65, Elektromechanik nach MAXWELL) zurückzuführen sind, so dass der Ausdruck $\frac{1}{\mu}\cdot\frac{d\mu}{dt}$, wenn μ die Gasdichte und $\frac{d\mu}{dt}$ die Änderung nach der Zeit ist, nicht Null, sondern einen endlichen Wert besitzt. Diese „Theorie", welche durch verschiedene experimentelle Beobachtungen gestützt wird, würde auf der einen Seite für die neueren Strahlungserscheinungen von Interesse sein und als Hülfsvorstellung neben der Arbeitshypothese der Jonen Beachtung verdienen, auf der anderen zu wichtigen Schlüssen oder auch Aufklärungen auf dem Gebiet der dielektrischen Festigkeit bezw. der Leitfähigkeit von Dielektricis führen, abhängig von den sie durchsetzenden kurzwelligen Strahlen. Aus dieser JAUMANNschen Annahme der Longitudinalwellen auf Grund einer Spur von Kompressibilität folgt zunächst das JAUMANNsche Gesetz, dass die dielektrische Leitfähigkeit bezw. Dichtigkeit und damit im Zusammenhang auch die dielektrische Festigkeit nicht von der Spannung E, sondern von dem Produkt $\left(E\cdot\frac{dE}{dt}\right)$ abhängt. Das letztere würde alsdann die Vergrösserung der Leitfähigkeit bezw. Verkleinerung der Durchschlagfestigkeit einer Dielektrikumsschicht erklären, wenn sie von sehr kurzwelligen Strahlen, d. h. mit hohen Werten von $\frac{dE}{dt}$ durchsetzt wird, also die Beobachtungen von HERTZ und anderen. Dass die Forscher aber in ihrer Mehrzahl für wahrscheinlich halten, man habe es bei jenen Strahlen mit sehr kurzen Transversalwellen zu tun, wurde bereits in dem geschichtlichen Teil (vgl. 38) erwähnt.

Eine weitere Erklärung der Abweichungen [illegible]
der Verschiedenheit [illegible]
zustand variiert [illegible]
Neben dem Einfluss [illegible]
Natur [illegible]
von PASCHEN [illegible]
frisch [illegible]
Potential [illegible]
[illegible]
[illegible]
bezw. [illegible]
wurde [illegible]
[illegible]
[illegible] 38 [illegible]
Funken [illegible]
[illegible]

Unter gewöhnlichen Verhältnissen fand FREYBERG abhängig von den Endflächen (1889, WIED. Ann. 38, 231) für die Durchschlagsspannung der Luft folgende Gleichspannungswerte ($\overline{E}$) in Kilovolt:

Durchschlagsspannungen ($\overline{E}$) in Kilovolt bei Luft nach Freyberg

Schlagweite in mm	Kugelradius der Grenzflächen in mm						
	5·0	7·5	10	20	40	60	Platten
1	5·05	—	4·66	4·56	—	4·53	4·31
2	8·60	9·70	9·50	8·70	8·40	7·90	7·50
3	11·10	12·50	11·70	11·60	11·20	10·50	10·70
4	13·50	14·10	14·00	14·40	14·20	12·80	13·70
5	15·10	16·80	16·80	17·00	16·60	16·40	16·20
6	16·60	18·40	19·30	19·50	20·10	19·20	19·10
7	17·90	19·90	21·00	22·50	23·20	22·00	—
8	18·40	20·90	23·20	24·60	25·80	26·00	24·50
9	19·30	21·30	25·10	27·20	27·80	28·80	—
10	19·50	22·10	25·80	29·00	29·90	31·60	28·50
11	19·80	23·00	26·40	30·90	31·90	32·80	—
12	21·10	24·80	27·90	32·70	34·20	35·00	—
13	22·00	25·60	28·20	—	—	36·70	—
14	22·50	26·20	28·50	—	—	41·40	—
15	23·10	27·20	29·50	—	—	—	—
16	23·20	28·30	30·90	—	—	—	—
18	23·80	28·60	34·00	—	—	—	—
20	24·60	29·10	35·40	—	—	—	—
22	25·70	29·50	36·00	—	—	—	—
24	26·00	30·00	37·20	—	—	—	—
26	27·10	30·50	—	—	—	—	—
28	27·90	30·80	—	—	—	—	—
30	28·40	31·20	—	—	—	—	—
35	29·20	31·90	—	—	—	—	—
40	29·60	32·40	—	—	—	—	—
45	29·90	33·50	—	—	—	—	—
50	30·70	34·10	—	—	—	—	—

Die von PASCHEN (a. a. O.) für beschränktere Abstände gefundenen Werte, welche meist grösser sind, erklären sich wohl durch das bei seiner Versuchsanordnung verhältnismässig langsame, weil durch grössere Kapazitäten verzögerte Anwachsen der Spannung. Für die Grösse der Abweichungen in den Werten verschiedener Beobachter möge folgende kleine Zusammenstellung für Kugeln mit dem gleichen Radius von 1 cm ein Bild geben.

Durchschlagsspannung ($\overline{E}$) in Kilovolt bei Kugeln von 1 cm Radius in Luft.

Schlagweite δ in cm	Baille	Freyberg	Czermak	Paschen	Quincke
0.1	4·59	4·66	4·54	4·79	4·43
0·2	8·04	9·53	7·96	8·17	7·91
0·3	11·19	11·67	11·24	11·50	11·19
0·4	13·63	13·96	14·30	14·68	14·00
0·5	16·40	16·80		17·75	
0·6	19·55	19·25		20·73	
0·7	21·7	20·95		23·64	
0·8	23·25	23·20			
0·9	24·0	25·1			
1·0	24·9	25·8			

Die Tabellen lassen einmal erkennen, dass die Durchschlagsspannung $\overline{E}_\delta$ langsamer wächst als δ, d. h. für Elektroden mit beschränkter Grösse die Festigkeit **nicht direkt** proportional mit der Schlagweite wächst, sondern etwas langsamer; ferner dass für eine bestimmte Schlagweite δ ein Kugeldurchmesser ein Maximum von $\overline{E}_\delta$ aufweist, und dass der Kugeldurchmesser, welcher das $(\overline{E}_\delta)_{max}$ liefert, mit der Schlagweite wächst (vgl. Tabelle von FREYBERG auf Seite 352).

Die von verschiedenen Beobachtern aufgestellten Schlagweite**formeln** gelten alle nur für beschränkte Verhältnisse, so dass man gegenwärtig im Gebrauchsfalle noch die Benutzung der Tabellen gegenüber den Formeln vorzuziehen hat. Über die Werte bei Wechselspannung siehe unten sowie **129**.

Eine wichtigere Beziehung, welche allgemeinere Geltung nicht nur für Luft, sondern nach den bisherigen Untersuchungen auch für andere Gase zu besitzen scheint, ist die unter sonst gleichen Verhältnissen vorhandene Konstanz der Durchschlagsspannung $\overline{E}_\delta$, solange das **Produkt** $p \cdot \delta$ aus Gasdruck p und Schlagweite δ konstant bleibt, jedoch unter reziproker Variation der beiden Faktoren p und δ in ziemlich weiten Grenzen (PASCHEN a. a. O.; vgl. auch **21**). Für Gase unter höheren Drucken fand WOLF (1889, WIED. Ann. 37, 306) bei Luft, O, N, CO_2 und Kugeln von 5 cm Radius die Durchschlagsspannung E_δ proportional mit p zwischen 1 und 5 Atmosphären, bei H zwischen 1 und 9 Atmosphären. Unter Anwendung des AVOGADROschen Gesetzes würde dies auf Proportionalität zwischen E_δ und der Anzahl der Gasmolekel in der auf ihre Festigkeit beanspruchten Gasstrecke hinweisen.

Die weitere Verfolgung der Beziehungen zwischen der dielektrischen Festigkeit der Gase und ihrer chemischen Valenzzahl (vgl. **121** und **42**) einerseits, ihrer mit dem Gasdruck zusammenhängenden Wirkungssphäre unter Zuziehung der kinetischen Gastheorie andererseits ergiebt nach EBERT (1899, WIED. Ann. 67, 626), dass ein Gas unter sonst gleichen Umständen um so durchschlagsfester ist, je grösser die in seinen Molekülen vereinigte Valenzzahl s ist, und je weniger

weit seine (molekulare) Wirkungssphäre ϱ sich ausdehnt, so dass angenähert die Beziehung $\bar{E}_\delta = c_\delta \cdot \frac{s}{\varrho}$ besteht, wenn c_δ eine nur noch vom Gasdruck abhängige Gaskonstante der dielektrischen Bruchfestigkeit bezeichnet. Die grössere dielektrische Festigkeit von CO_2 gegenüber H_2 — nach PASCHEN besteht unter sonst gleichen Umständen das Verhältnis von etwa 5 : 3 — erklärt sich daraus, dass das grössere ϱ bei CO_2 überkompensiert wird durch die Valenzzahl s, welche bei CO_2 den Wert 8, beim Wasserstoffmolekül H_2 hingegen 2 hat. In diesem Zusammenhang gewinnt der Ausbau der FARADAYschen Feldauffassung durch J. J. THOMSONS Hülfsvorstellung über die Rolle der Valenzen eine gewisse Bedeutung, wonach das Niederbrechen (Durchschlagenwerden) des Dielektrikums in folgender Weise eingeleitet würde: die Valenzstellen würden nach Art von leitenden Körpern (vgl. Fig. 56 in **117**) die Kraftröhren (Induktionslinien) an sich heranziehen; durch die Spannung (stress) längs der Kraftröhren würde das Molekül auf Zugfestigkeit beansprucht werden und bei hinreichender Steigerung des Spannungsgefälles zwischen den ladenden Flächen in Atome zerrissen oder dissoziiert werden. Diese Jonisierung der Moleküle würde den Übergang zur Leitung der Gasstrecke darstellen und damit das Niederbrechen des mechanischen Widerstandes.

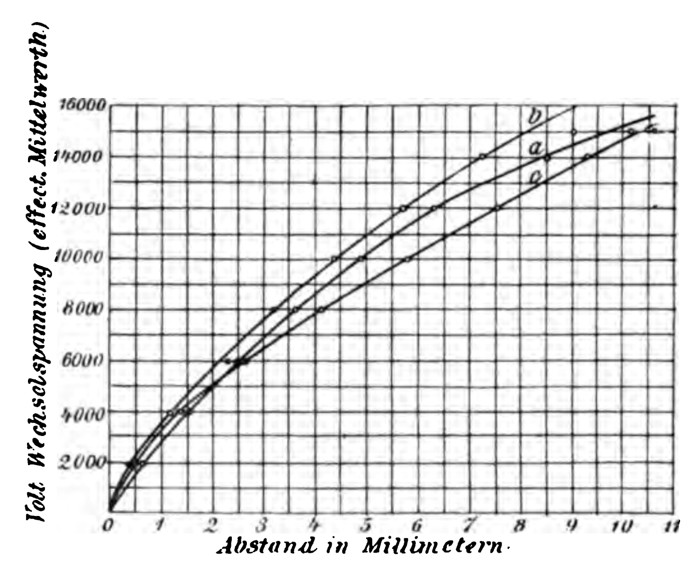


Fig. 65.

Kurve a = 2 Scheiben t = 14·75° C.,
" b = Halbkugel und Scheibe t = 16 bis 17° C. Luftfeuchtigkeit 80%,
" c = Spitze und Scheibe t = 12° C. " 50%.

Die Resultate von A. SIEMENS (vgl. ETZ 92, 248) über dielektrische Bruchbelastung in Volt Wechselspannung effektiv gemessen, sind für Luft und verschiedene Begrenzungsverhältnisse in Fig. 65 dargestellt, wobei die eine Leiterbegrenzung stets durch eine Scheibe (Ecken gut abgerundet) von 100 mm Durchmesser, die andere durch eine solche von 38 mm bezw. eine Halbkugel von 10 mm Durchmesser, bezw. Stahlspitze (Neigung 60°, Seite 5 mm) gebildet war.

Eingehende und sehr interessante Untersuchungen mit Wechselspannungen über „disruptive Erscheinungen in Dielektricis unter hohen elektrischen Spannungen“ sind von CH. P. STEINMETZ (1893 ETZ, 248) veröffentlicht worden. Die von ihm hieraus abgeleitete empirische Schlagweiteformel für Luft

$$\delta_L = c\left(\varepsilon^{-\eta \tilde{E}} - 1\right) + a\,\tilde{E} + b\,\tilde{E}^2,$$

worin δ in Einheiten von $10\,\mu = 0{\cdot}01$ mm, $\tilde{E}$ in Kilovolt einzusetzen ist, während ε = Basis der nat. Log., würde für die Grenzen von 180 bis 24000 Volt, die Konstanten $\eta = 1{\cdot}3$, $a = 54$ und $b = 1{\cdot}2$ ergeben und bei Extrapolation auf $\tilde{E} = 100000$ Volt $\delta = 18$ cm; auf 250000 $\delta = 90$ cm und für $\delta = 1$ km (Blitz) den Wert $9 \,.\, 10^6$ Volt (vgl. a. a. O., 253). Ebenda siehe auch Angaben über Durchschlagsspannungen fester Materialien.

129. Dielektrische Festigkeit von flüssigen und festen Stoffen.

Die quantitativen Bestimmungen der Durchschlagswerte bei festen und flüssigen Stoffen werden, abgesehen von der weit geringeren Anzahl von vorliegenden eindeutigen Messresultaten, infolge Materialverschiedenheit (vgl. 120) naturgemäss noch weniger allgemeine Gültigkeit besitzen als bei Gasen, aber immerhin einen gewissen Anhalt gewähren können.

An technisch wichtigeren Materialien sind solche Messungen neuerdings auch von LOMBARDI (1899, ETZ 714) vorgenommen worden, als er nach geeigneten Materialien für Hochspannungskondensatoren zum Betrieb mit Wechselstrom suchte. Die gefundenen Durchschlagswerte der effektiv gemessenen Wechselspannung sind für ebene Platten bei Luft, Öl und Paraffin folgende:

Durchschlagsspannung $\tilde{E}_\delta$ in Kilovolt (effektiv).

Plattendicke δ	Luft		Öl	Paraffin
in mm	$\tilde{E}_\delta$	$\tilde{E}_\delta \cdot \sqrt{2}$	$\tilde{E}_\delta$	$\tilde{E}_\delta$
1	3·3	4·67	12·0	ca. 40
2	5·8	8·6	21·0	
3	7·7	10·9	27·5	
4	9·3	13·13	32·6	
5	10·5	14·9	37·2	

Der Vergleich der hinzugefügten maximalen Spannungswerte bei Annahme von Sinusform unter $\tilde{E}_\delta \sqrt{2}$ zeigt mit der früheren Tabelle der Durchschlagsspannungen der Luft bei Gleichstrom (vgl. 128) leidliche Übereinstimmung.

Bei flüssigen und festen Dielektricis steigt gleichfalls die Festigkeit meistens nicht direkt proportional mit der Dicke, sondern etwas langsamer. Auch das Verhältnis der durchschlagenen Schichtdicken zweier Dielektrika für eine bestimmte Spannung scheint wesentlich von der Spannungshöhe und den sonstigen Verhältnissen abzuhängen. So giebt E. THOMSON (vgl. ETZ 92, 416) an: Das Durchschlagen einer Ölschicht zwischen zwei Kugeln von 13 mm

Durchmesser bei einem Abstand von 50 mm erfordert eine Spannung, welche fähig ist, in der Luft Funken von 1·5 m zu geben. Für paraffiniertes Papier soll nach Untersuchungen von GRAY (1898) Proportionalität zwischen Durchschlagsspannung und Schichtdicke bestehen, vgl. auch STEINMETZ (a. a. O. Fig. 7). Glimmer hingegen zeigt für dünnere Schichten wiederum kein proportionales, sondern langsameres Wachsen der dielektrischen Festigkeit, wie Fig. 66 erkennen lässt, welche für 0 bis 1·0 mm Schichtdicke die Durchschlagsspannungen E_δ in Kilovolt und daraus abgeleitet die reziproke Kurve der spezifischen dielektrischen Festigkeit E' in Kilovolt (bezogen auf 1 mm) angiebt.

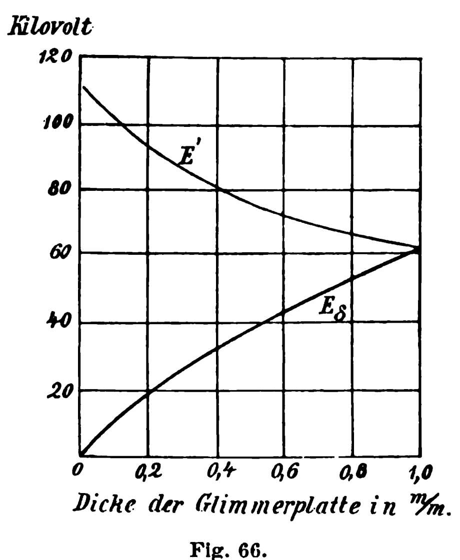


Fig. 66.

Versuche bei SIEMENS & HALSKE mit hochgespanntem Wechselstrom und verfügbarer grösserer Energiemenge (vgl. ETZ 1891, 266) haben folgende Durchschlagszahlen ergeben:

Weichgummiplatte von 1 mm Dicke zwischen zwei runden Messingscheiben von etwa 100 mm Durchmesser wird bei etwa 10 000 Volt durchschlagen,
Hartgummiplatte von 1 mm Dicke bei 20 000 Volt noch nicht durchschlagen,
Glasplatte . . . „ 3 „ „ „ „ „ „ „ „

Ferner wurde mit 20 000 Volt bei stetiger Annäherung eine Ölschicht zwischen Schraubenenden mit runden Kuppen bei etwa 3 mm Entfernung durchschlagen:

Luftschicht zwischen Kugeln von 1 mm Durchmesser bei etwa 10 mm,
„ „ Platten „ 4 „ „ „ „ 20 „
„ „ Kegelspitzen von 45° Neigung „ „ 30 „

nachdem vorher eine stille Entladung, dem St. Elmsfeuer ähnlich, aufgetreten war, während nach dem Durchschlagen ein Lichtbogen von etwa 1 bis 2 Amp. und 6000 Volt Spannung bestehen blieb, welcher die Schenkel eines spitzwinkligen Dreiecks bildete, dessen dunkle kurze Basis durch die Elektroden ging (vgl. a. a. O.).

Nach Untersuchungen im Kabelwerk von F. CLOUTH (vgl. Upp. Kal. 1901, 93) wurden mit einer W e c h s e l spannung $\tilde{E} = 20000$ Volt (effektiv) folgende Schichtdicken von Isoliermaterialien durchschlagen:

Material	d in mm	Material	d in mm
Luft	34	Isolieröl für Transformatoren	2·0
Dicköl	9·64	Steinkohlenparaffin	2·2
Kabel-Imprägniermasse . . .	0·2	Muffenausgussmasse	0·44
Ceresin	0·65	Leinöl	7·5
Ozokerit	0·65	Stearinpech	8·0
Bienenwachs	0·25	Guttapercha	0·34
Paraffin	0·5	Nicht vulkanisierter Gummi .	0·85
Venezianischer Terpentin . .	0·5	Vulkanisierter Gummi . . .	1·2

Leider fehlen nähere Angaben über die Gestaltung der Grenzflächen.

Dass die so erhaltenen Zahlen aber nicht o h n e w e i t e r e s auf Kabel zu übertragen sind, zeigen die Überlegungen in **115** über die ungünstigere, d. h. ungleichförmigere Beanspruchung bei letzteren gegenüber den Versuchen mit Platten oder auch Kugeln als Begrenzungen des Dielektrikums.

Bei Kabeln mit kreisförmigem Kupferquerschnitt ist, wie in **115** angegeben, die dielektrische Beanspruchung in den einzelnen Schichten des Dielektrikums verschieden und unmittelbar am Kupfer am grössten. Auf Grund von neueren Versuchen an Hochspannungskabeln (vgl. ETZ 1901, 1070) hat BAUR für die Durchschlagsspannung die empirische Formel

$$\tilde{E} = c\sqrt[3]{d^2}$$

aufgestellt, wenn d die Isolationsdicke in mm bedeutet und die Konstante c nach Versuchen von SCHÄFER a. a. O., bei Isolationen aus reinem „Kabelit", aus reinem, gut vulkanisiertem Gummi und aus Schichten von Papier und Kabelit in der Gegend von 10000 Volt pro mm, liegt, welcher Wert somit auch die elektrische Bruchbelastung für $d = 1$ mm wäre.

Durchschlagsversuche an konzentrischen Kabeln von A. SIEMENS (vgl. ETZ 1892, 88) haben gleichfalls bei Wechselspannung unter Einsetzung der effektiven Mittelwerte die Kurven der Fig. 67 für die Durchschlagsspannungen ergeben. Die Kurven lassen ausnahmslos in Übereinstimmung mit den Folgerungen in **115** erkennen, dass die dielektrische Bruchfestigkeit langsamer als die Isolationsdicke wächst, so dass die erzielte Wirkung bei Kabeln nicht annähernd im Verhältnis zum Materialaufwand steht. Abgesehen hiervon dürfte bei allen derartigen Angaben auch insofern etwas Vorsicht geboten sein, als die dielektrische Bruchbelastung jedenfalls in hohem Grade von der Temperatur abhängig ist und letztere wieder sehr von der vorhandenen Wärmeableitung der dielektrischen Verlustwärme abhängt. Ist die letztere ungünstig, wie z. B. in einem in Holz eingeschlossenen, [illegible] l u f t f r e i e n Paraffinpapier[illegible] Wechselstrom das [illegible] hältnismässig [illegible]

Weitere Angaben über technisch verwendete Isolationsmaterialien, ihre elektrischen Eigenschaften und Durchschlagsfestigkeiten vgl. Bd. IV, Kap. 58, ferner in der ETZ 1899, 714; 1900, 313; 1902, 170.

130. Elektrische Dichtigkeit gasförmiger Dielektrika. Glimmlicht.

Neben der Widerstandsfähigkeit gegen ein Zusammenbrechen oder Durchschlagenwerden ist bei den „Isolatoren" noch ihre Durchlässigkeit nach Art einer porösen Wand von Wichtigkeit. Das Mass für den reziproken Wert dieser spezifischen Durchlässigkeit (des Leitvermögens) eines Isoliermaterials wird als der spezifische Widerstand kurzweg bezeichnet. Diese Eigenschaft der Materialien wird zwar im allgemeinen bei den Ausgleicherscheinungen zu behandeln sein, da man aber aus praktischen Gründen gut thut, die Zweiteilung in Leiter einerseits, Isolatoren oder Dielektrika andererseits beizubehalten (vgl. in **111**), so erscheint es auch zulässig, diese bei den Dielektricis gleichfalls bis zu einem gewissen Grade vorhandene elektrische Durchlässigkeit, von welcher Eigenschaft für gewöhnlich abstrahiert wird, in

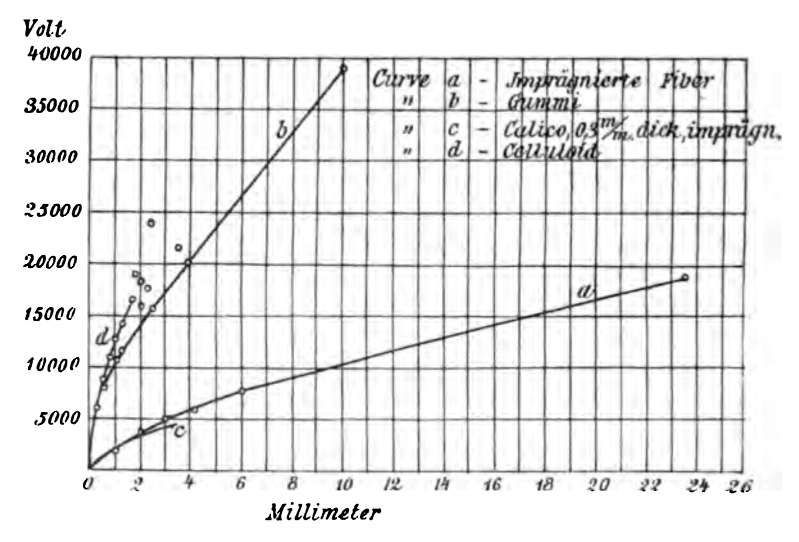


Fig. 67.

Zusammenhang mit den übrigen Eigenschaften derselben zu behandeln. Dass aber dieses Kapitel wiederum zu den Erscheinungen der Gasentladungen in II. I, 2 hinüberleitet und mit Rücksicht auf eine übersichtliche Stoffeinteilung eine gewisse Willkürlichkeit der Abgrenzung in der Kontinuität der Erscheinungen einschliesst, ist unschwer kenntlich (vgl. **108**).

Auch hier sind die Untersuchungen über die Erscheinungen der elektrischen Durchlässigkeit bei Gasen, namentlich Luft, bisher viel umfangreicher als bei flüssigen und festen Dielektricis (vgl. II. I, 2), besonders wenn man die bei niederen Drucken untersuchten sogenannten Gasentladungen mit hinzurechnen würde.

In der Regel nahm man bisher an, dass Luft von Atmosphärendruck völlig isoliert; es ist jedoch höchst wahrscheinlich geworden, dass es sich für niedere Spannungen und Temperaturen und höhere Gasdichten bezw. Luftdrucke nur um zu kleine und vorläufig durch Messung schwer nachweisbare Mengen von durchsickernder bezw. fortgeführter Elektrizität handelt. Wird die Spannung hinreichend gesteigert, so verhält sich gewöhnliche Luft

ganz ähnlich wie entsprechend verdünnte Luft bei niederen elektrischen Spannungen, d. h. es treten unter Glimmlichterscheinungen an den Drähten — also dem kleinsten (aktiven) Querschnitt für den Übergang aus dem Draht als Elektrode in die Luft — wachsende Strom- und Leistungsverluste auf. In ähnlicher Weise nimmt bei Temperatursteigerung die elektrische „Porosität", d. h. ihre Leitfähigkeit zu.

Die Verluste auf Grund beschränkter elektrischer Dichtigkeit der Luft erheischen für die Weiterentwickelung der Wechselstromtechnik nach Seite einer weiteren Steigerung der Betriebsspannung die grösste Aufmerksamkeit. Nach Ch. F. Scott (vgl. 1899, ETZ, 118) haben Versuche mit hochgespanntem technischen Wechselstrom bis über 50 000 Volt (effektiv) folgende Resultate ergeben.

Horizontal gespannte Drähte von 0·91 mm Durchmesser im Abstande von 10 cm wurden mit wachsender Hochspannung bearbeitet. Als die Spannung oberhalb 10 000 Volt immer weiter gesteigert wurde, begannen sie nach jener Schilderung ein „zischendes oder krachendes Geräusch von sich zu geben, und ein wenig unter 20 000 Volt zu leuchten. Bei dieser Spannung war das Geräusch stark, die Drähte kamen in Schwingungen und wurden mehr und mehr leuchtend, bis sie bei höheren Spannungen von einer bläulichen Lichthülle umgeben waren. Stellenweise waren glänzende Punkte bemerkbar, wahrscheinlich entsprechend kleinen Staubteilchen oder rauhen Stellen auf dem Drahte. Der grosse Versuchsraum wurde bald stark mit Ozon angefüllt."

Diese Beobachtungen über das qualitative Verhalten entsprechen im allgemeinen den sogenannten Glimmlichterscheinungen bei der Zwischenschaltung verdünnter Gasstrecken zwischen geringere Spannungen, oder auch den reibungselektrischen Ausgleicherscheinungen in Gestalt des Glimmlichtes, nur dass im letzten Falle es sich um Energiebeträge von ganz anderer Grössenordnung handelt, was für den Erscheinungscharakter von erheblichem Einfluss sein kann. Es ist nun durchaus natürlich, dass unser wichtigstes Wahrnehmungsorgan auf die Entwickelung unserer Erkenntnis dieser Erscheinungen einen grossen Einfluss ausgeübt hat, was namentlich bei Betrachtung aller physikalischen Untersuchungen über Gasentladungen sofort in die Augen fällt. Man muss aber auf der anderen Seite zugeben, dass das an sich in seiner direkten Wahrnehmungsfähigkeit sehr beschränkte Auge geneigt ist, die Leuchterscheinungen zu stark gegenüber den unsichtbaren Ausgleichvorgängen (Strahlungen) zu betonen und die Auffassung nach dieser Richtung zu beeinflussen. Daher erscheinen die genaueren Messungen der Ausgleich- und Energiegrössen für eine gleichsam objektivere Auffassung und vorgeschrittenere geistige Beherrschung dieses Erscheinungsgebietes von grösserer Wichtigkeit.

Für die obengenannte Versuchsanordnung ergab sich bei einer Drahtlänge von 180 m der auf die Drähte entfallende und durch jene Glimmlichtentladung bedingte Nettoverlust in Watt abhängig von der Spannung (effektiver Mittelwert) in Kilovolt wie in Fig. 68, wobei die ausgezogene Kurve die für 60 sekundliche Perioden, die strichlierte die für 133 Perioden gefundenen Verluste darstellt. Die Kurven lassen erkennen, dass „der Verlust zwischen den Drähten, nachdem man eine kritische Spannung erreicht hat, sehr schnell wächst, dass er unabhängig ist von der Periodenzahl." Entsprechende Messungen, welche an einer 3·6 km langen Freileitung unter

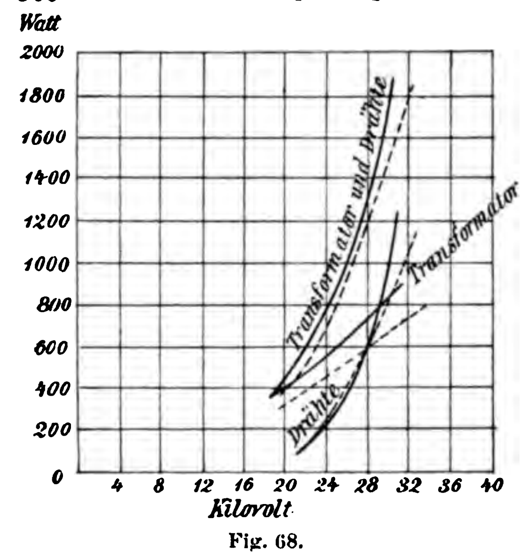


Fig. 68.

Änderung der Drahtentfernung angestellt wurden, ergaben die reinen Verluste durch Glimmlichtentladung zwischen den Drähten in Watt abhängig von der Spannung in Kilovolt bei verschiedenen den Kurven beigeschriebenen Drahtentfernungen in cm wie in Fig. 69. Wenn man annimmt, dass die verlorene Leistung W als JOULEscher Verlust, d. h. durch reinen elektrischen Reibungswiderstand im Dielektrikum bewirkt, aufzufassen ist, so dass die Gleichung gilt

$$W = \frac{E^2}{R},$$

worin R, jener Reibungswiderstand des durchlässigen Dielektrikums, so liesse sich dieser Wert für die ganze Leitung bezw. ihre Längeneinheit, z. B. 1 cm, ohne weiteres berechnen und die zugehörigen Kurven für die Werte der Durchlässigkeit aufstellen. So wäre z. B. für die Entfernung von 56 cm für die beiden Drähte der Verlust bei 52 Kilovolt etwa 2700 Watt, woraus folgen würde

$$R = \frac{E^2}{W} = \frac{52^2 \cdot 10^6}{2700} = 1 \cdot 10^6 \, \Omega,$$

oder für 1 cm der Leitungslänge $R_1 = 36 \cdot 10^{10} \, \Omega$. Dieser Wert bliebe jedoch keineswegs konstant, sondern würde bei höheren Spannungen bezw. der zugehörigen höheren Glimmentladungsstromstärke rasch ab-, bei niederen rasch zunehmen, ein Verhalten, das bei allen anderen Gasentladungen — auch Entladungen durch feste oder flüssige Dielektrika (vgl. H. I, 2) — in entsprechender Weise vorliegt und einen derart eingeführten dielektrischen Widerstand als völlig abweichend von dem OHMschen Widerstand eines Leiters erkennen lässt, der unabhängig von Stromstärke bezw. Spannung ist.

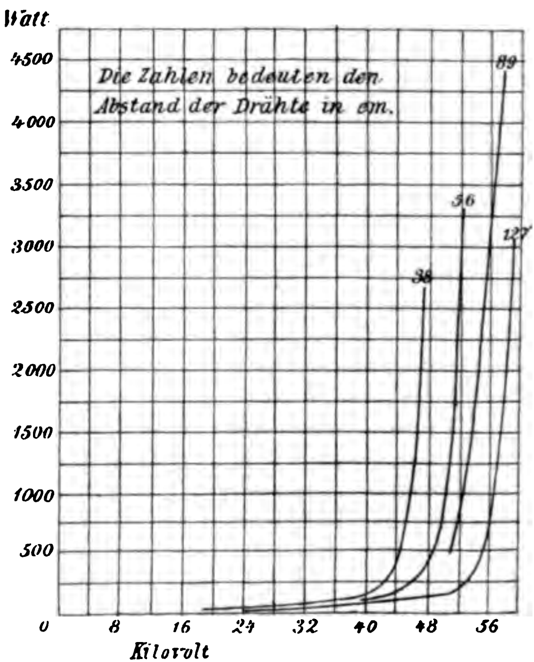


Fig. 69.

Die oberhalb einer kritischen Spannung, welche durch das Knie in Fig. 69 gekennzeichnet wird und mit dem Abstand der Drähte variiert, rasch wachsende elektrische Durchlässigkeit der vorher nahezu vollkommen isolie-

renden Luft würde nach der gegenwärtig verbreitetsten und von H. HERTZ wohl zuerst entwickelten Anschauung über die Natur des mit höherer Durchlässigkeit gepaarten Glimmlichtes in folgender Weise vorzustellen sein: Von dem jeweils die Kathode bildenden Leiter werden negativ elektrisch geladene Teilchen losgeschleudert, welche die „Kathodenstrahlen" bilden und wegen ihrer Kleinheit — sie liegen nach den neueren Untersuchungen (vgl. 79) der Grössenordnung nach weit unter dem leichtesten bekannten Jon (Wasserstoff) — wohl auch als „Mikroionen" bezeichnet werden. Die translatorische Energie dieser geschleuderten Teilchen wird aber sehr bald in den davor liegenden Gasmassen absorbiert, wie die Bewegungsenergie eines geworfenen Körpers in einem widerstehenden Medium, z. B. Wasser oder einer zähen Masse: die absorbierte oder von den geschleuderten Teilchen abgegebene Energie wird aber zur Dissociation der getroffenen Gasmoleküle verwendet, durch deren Jonisierung sich das mit der Anzahl dissociierter Moleküle proportionale Leitvermögen bezw. die Durchlässigkeit der Luftstrecke erklärt in Verbindung mit dem „Luminiscenzleuchten" der oscillierenden Valenzladungen (vgl. 57).

Diese Vorstellung würde auch mit den Schlüssen, welche B. WALTER (1898, WIED. Ann. 66, 636 oder auch ETZ 1899, 62) aus seinen photographischen Aufnahmen zur Untersuchung der Entstehungsweise des elektrischen Funkens gezogen hat, gut übereinstimmen: Der Funke würde hiernach gewöhnlich nicht sofort, gleichsam auf den ersten Angriff der dielektrischen Trennungsschicht zur Ausbildung gelangen, sondern durch stossweise aufeinander folgende und — unter Benutzung der durch die vorhergehenden bereits gebrochenen Strasse — immer weiter vorschreitende Büschelentladungen den Weg gebahnt erhalten. Die baumartigen Verästelungen, welche an dem vorderen Ende des Büschelentladungsweges auftreten und die scheinbaren Enden der durch ihr Leuchten sichtbaren Ausgleichbahnen bilden, fallen bei den folgenden Funkenbahnen und schliesslich der ganz durchgebrochenen weg, doch zeigt die letztere immer noch die Knicke der stossweis vorschreitenden Büschelentladungen, durch deren Abweichungen vom geometrisch kürzesten Wege wohl auch gewisse Abweichungen in den beobachteten Durchschlagsspannungen erklärt werden. Der Einfluss solcher „Zufälligkeiten" auf die Funkenbahn ist übrigens auch von FARADAY schon klar ausgesprochen worden (vgl. Exp. Res. 1568).

Es würde ferner aus der früher (in **115** bei Fig. 55) abgeleiteten Verschiedenheit des Spannungsgefälles im Dielektrikum folgen, dass die Beanspruchung des Dielektrikums auf Bruchfestigkeit bei gegebener Spannung E am Leiterumfang am grössten ist und mit abnehmendem Drahtdurchmesser rasch wächst (vgl. Fig. 55). Je dünner der Draht, desto schneller würde also die Grenze der dielektrischen Bruchfestigkeit unmittelbar am Draht erreicht werden und eine Erweiterung des leitenden Kanales durch Glimmlichtbildung eintreten, womit gleichsam eine Selbstregulierung des Spannungsgefälles Hand in Hand gehen würde, insofern durch die Glimmlichthülle der Radius des leitenden Kanales vergrössert würde und zwar stets so weit, bis das Spannungsgefälle im begrenzenden undurchbrochenen Dielektrikum auf den Grenzwert von etwa 30 Kilovolt pro cm (dielektrische Bruchbelastung bei Luft vgl. **128**) gesunken ist.

Die weiteren Folgerungen aus jener Betrachtung besitzen für die Entwickelung der Hochspannungstechnik grosses praktisches Interesse, namentlich

der Einfluss einer Drahtisolierung von höherem $\varkappa$, sowie der Einfluss eines mangelhaften Anliegens derselben (Luftschicht); ferner bei Hochspannungskondensatoren die Wichtigkeit eines luftfreien Dielektrikums u. s. f.

131. Einfluss des Gasdruckes und der Bestrahlung. Spinterometer.

Für verdünnte Gase wie Luft, N, CO_2, H, CO hat EBERT (1899, WIED. Ann. 67, 608) gezeigt, dass bei stetig zunehmender Verdünnung oder Verminderung des Gasdruckes ein sogenannter Umkehrdruck erreicht wird, bei welchem die Durchlässigkeit ein Maximum wird, insofern zu einem deutlich ausgeprägten Spannungsminimum ein schwach ausgeprägtes Strommaximum gehört, während die im Dielektrikum umgesetzte bezw. verlorene Leistung wie die Spannung variiert, also bei jenem Umkehrdruck bei den Versuchen auch ein Minimum aufwies. Dieser Umkehrdruck U in mm Quecksilbersäule ausgedrückt, ergab sich für die untersuchten Gase wie folgt:

	U	λ_{760}	$\lambda_{760} : U$
Wasserstoff . . .	1·26	185 $\mu\mu$	147
Stickstoff	0·65	99 „	152
Kohlenoxyd . . .	0·65	98 „	150
Luft	0·60	95 „	158
Kohlensäure . . .	0·47	68 „	144

Unter λ_{760} sind noch die die mittleren freien Weglängen der Gase bei Atmosphärendruck nach der kinetischen Gastheorie in $\mu\mu = 10^{-6}$ mm angeführt, sowie daneben der angenähert konstante Quotient $\lambda_{760} : U$.

Die absoluten Grössen der Durchlässigkeit hängen natürlich von der Form der benutzten Entladungsröhren ab, so dass die Angabe der Werte abhängig vom Gasdruck nur vergleichsweise, wenn auch als Gesamtwert in absoluten Einheiten, möglich ist. In Fig. 70 ist die Abhängigkeit des Widerstandes in Ohm (bezw. der reziproken Durchlässigkeit in Mho)

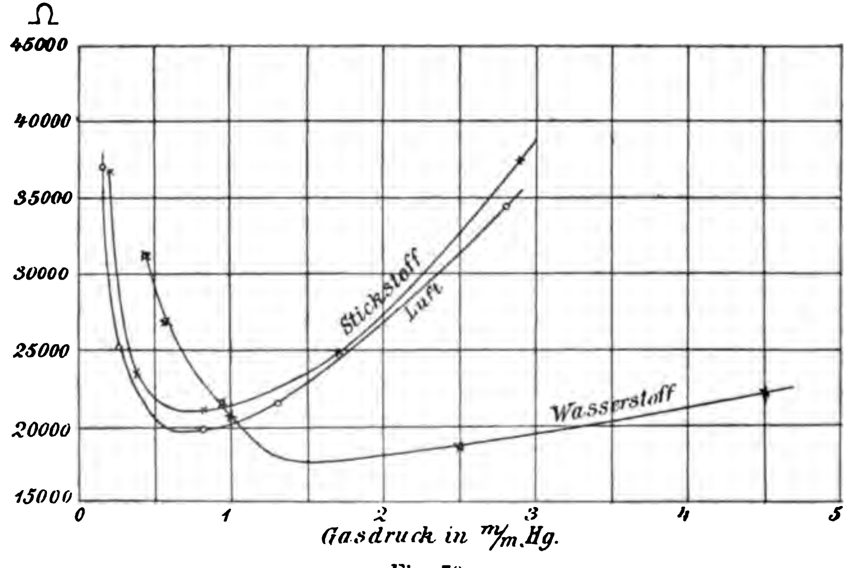


Fig. 70.

für Luft, N und H abhängig vom Gasdruck in mm Quecksilbersäule aus den Versuchen von EBERT dargestellt, bei welchen das Entladungsrohr aus zwei weiten kugelförmigen Elektrodenräumen von 8·5 cm Durchmesser bestand, welche scheibenförmige Aluminiumelektroden von 3·2 cm Durchmesser enthielten; beide Elektrodenräume waren durch ein kurzes, 6 cm langes, 4 cm weites cylindrisches Rohr mit einander verbunden. Weiteres vgl. unter Gasentladungen in H. I, 2.

Die Beeinflussung des Isolationsvermögens, bezw. der elektrischen Durchlässigkeit der Luft oder anderer Gase dürfte auch in allen anderen bisher beobachteten Fällen auf eine Änderung des Jonisierungszustandes entweder vorerst, was die Regel zu bilden scheint, an den Grenzflächen mit den Elektroden oder auch sogleich auf der ganzen Strecke, zurückzuführen sein. So wurde schon in **128** die von HERTZ beobachtete Einwirkung der von einer Funkenstrecke ausgehenden Wellen, namentlich der ultravioletten Lichtwellen, auf den Funkenübergang bezw. auf den Widerstand einer anderen Luftstrecke erwähnt (vgl. **38**). Hierher gehört wohl auch die von ARRHENIUS (1888, WIED. Ann. 33, 638) beobachtete Wirkung der Belichtung, welche eine Vergrösserung der elektrischen Durchlässigkeit verdünnter Luft zur Folge hatte; ferner die zuerst von HALLWACHS (1888, WIED. Ann. 33, 301 und 1889, 37, 656) beobachtete Beschleunigung in der Zerstreuung negativer Ladungen bei Belichtung des geladenen Leiters, wobei auch die kurzwelligen (chemisch besonders wirksamen, ultravioletten) Lichtstrahlen die Hauptrolle spielen, vermutlich durch Dissociierung (Jonisierung) der angrenzenden Luftpartien. Dass auch der geladene Leiter selbst dabei beteiligt ist, beweist die verschieden starke Wirkung verschiedener Metalle, so ist z. B. Aluminium wirksamer als Zink und letzteres wirksamer als Eisen. Nicht nur Metalle, sondern auch Salze zeigen dieses Verhalten (vgl. ELSTER-GEITEL 1897, WIED. Ann. 62, 599). Auch die Zerstreuung positiver Ladungen soll in ähnlicher Weise, wenn auch weit schwächer durch Belichtung erfolgen (1890, BRANLY, Compt. rend. 110, 751).

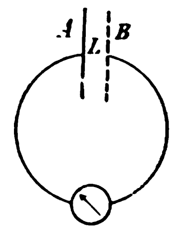


Fig. 71.

Die von HALLWACHS (1888, WIED. Ann. 34, 731) und RIGHI zuerst gemachte Beobachtung, dass durch Belichtung auch eine schwache positive Ladung auf gewissen Metallen, namentlich Zink und Aluminium, entstehen kann, hängt vermutlich mit der vorausgegangenen Erscheinung zusammen, wobei die Luft oder auch ein anderes benutztes Gas die Rolle des Elektrolyten spielt, so dass die sogenannte Berührungselektrizität die eigentliche Erregungsursache bildet. Dass die früher häufig als indifferent angenommene Luft bei diesen Erscheinungen der elektrischen Spannungserregungen aktiv beteiligt ist, geht zwar schon aus älteren, teilweise aber nicht genügend berücksichtigten Beobachtungen hervor, dürfte aber unzweideutig aus der Einwirkung der ultravioletten und der Röntgenstrahlen auf die Beschaffenheit von Luftzwischenstrecken hinsichtlich ihrer elektrischen Leitfähigkeit oder — unter Annahme der bei Elektrolyse von Flüssigkeiten entwickelten Auffassung über das Leitvermögen — aus ihrer Jonisierung folgen.

So lässt sich der zuerst von STOLETOW (vgl. Wk. III a, 375) beobachtete sogenannte aktinoelektrische Strom durch diese lichtelektrische Spannungserregung erklären, wobei die Luftschicht L zwischen der festen Metallplatte A (Fig. 71) und dem Drahtnetz B, durch welches hindurch die Belichtung mit stärker brechbaren Strahlen stattfindet, teilweise ionisiert, d. h. erregend und zugleich leitend

gemacht wird, so dass man es mit einem Luftelement zu thun hat. Die Herstellung eines solchen galvanischen Elementes mit Luft als Leiter zweiter Klasse durch Jonisierung derselben wurde auch mit Röntgenstrahlen erzielt und die Spannung zwischen verschiedenen Metallen durch J. Perrin entsprechend dem Spannungsgesetz gefunden, sowie der in der Anordnung von Fig. 71 erzielte Dauerstrom zu $7 \cdot 10^{-9} A$ gemessen. Ähnliche Untersuchungen von A. Winkelmann (1898, Wied. Ann. 66, 1 oder ETZ 1898, 776) ergaben die Spannung von Eisen-Luft-Kupfer zu 0·5 Volt, den inneren Widerstand der Luftschicht grösser als $10^8\ \Omega$, jedoch der spezifische Widerstand der Luft abhängig von der Intensität der Röntgenstrahlen und der Entfernung des „Fensters", aus welchem sie austraten; offenbar beeinflusst beides die Stärke der Jonisierung, auch die Unterbrechungszahl scheint von Einfluss. Wurde unter sonst gleichen Verhältnissen die Plattenentfernung des Luftelementes geändert, so folgt aus der Stromstärke ein Anwachsen des inneren Widerstandes angenähert proportional der Plattenentfernung.

Diese Erscheinung steht auch in innerer Übereinstimmung mit der Beobachtung, dass Röntgenstrahlen erleichternd auf die Funkenentladung wirken (Starke 1898, Wied. Ann. 66, 1009), indem sie durch Jonisierung die dielektrische Bruchfestigkeit vermindern. Ein Unterschied gegen ultraviolettes Licht besteht aber darin, dass letzteres vornehmlich nur auf die Kathode eine merkbare Einwirkung zeigt, während Röntgenstrahlen auf beide Pole wirken. Die Erklärung dafür, dass die Elektroden, d. h. die Grenzflächen zwischen Metall und Luft bestrahlt werden müssen, könnte die Berührung beider für den Eintritt der Jonisierung erforderlich erscheinen lassen; noch einfacher ergiebt sie sich aber vielleicht aus der oben (**130** am Schluss) erwähnten Entstehungsweise der Funken, d. h. aus dem Erfordernis des Ausganges der den Funkenübergang einleitenden Büschelentladungen von den Elektroden aus. Auch andere Strahlungen, wie Thor- und Uranstrahlen wirken ionisierend auf die Luft, d. h. machen dieselbe besser leitend (vgl. ETZ 98, 554, siehe ferner H. I, 2). Über den Jonisierungszustand der Erdatmosphäre in Verbindung mit dem voraussichtlichen Einfluss der Sonnenstrahlung auf die dielektrische Dichtigkeit derselben siehe auch gegen Schluss von **37**.

Mit dem Charakter der Kathodenstrahlen (vgl. **37**) hängt wahrscheinlich auch die Thatsache zusammen, welche bereits von Faraday beobachtet wurde (vgl. **21**), dass bei Verschiedenheit der Elektrodenform die Polarität auf die Einleitung des elektrischen Ausgleiches durch die Luft Einfluss besitzt, so dass die „Ausströmung" in Luft an einer Spitze bei Verbindung der letzteren mit dem negativen Pol bei kleineren elektrischen Spannungen eintritt, als bei Verbindung mit dem positiven Pol. In Wasserstoff tritt, abgesehen von der geringeren dielektrischen Festigkeit dieses Gases (vgl. Fig. 70), dieser Unterschied nicht auf (vgl. Wesendonck 1897, Wied. Ann. 60, 209).

Eine Ergänzung zu den früher (**128**) mitgeteilten Minimalspannungen zur Durchbrechung von nicht durch Strahlung beeinflussten Luftstrecken von 1 mm aufwärts bieten die Untersuchungen von Salvioni mit dem sogenannten Spinterometer (vgl. ETZ 1898, 839) zur Feststellung der Spannung, welche zum elektrischen Ausgleich bei ausserordentlich geringen Abständen zwischen Metallteilchen bis herab zu etwa $\frac{1}{10000}$ mm $\left(\frac{1}{10}\,\mu\right)$ erforderlich ist. Diese Verhältnisse besitzen nicht nur theoretisches Interesse im Anschluss an die im Vorhergehenden behandelten Erscheinungen, sondern auch ein gewisses prak-

tisches Interesse zur Aufklärung der bei der drahtlosen Telegraphie verwendeten „Cohärer“- oder Fritter-Erscheinungen, insofern das Spinterometer gleichsam ein Cohärerelement darstellt. Als Grenzspannung $\overline{E}$, bei welcher das vorher neutralisierte Spinterometer mit dem in $\mu = 0{\cdot}001$ mm angegebenen Kugelabstand gerade noch keinen Strom zustande kommen lässt, findet SALVIONI folgende Werte in Zink-Kupfer-Elementen (also reichlichen Volt) angegeben für die bis nahe an die dielektrische Bruchfestigkeit beanspruchten Luftstrecken:

Gleichspannung $\overline{E}$ =	50	75	100	150	200	300	380,
Luftstrecke in μ =	0·06	0·08	0·13	0·21	0·36	0·73	1·14.

War einmal eine Entladung eingeleitet, so blieb alsdann die dielektrische Festigkeit der Strecke sehr stark geschwächt und zwar auf längere Zeit. Diese interessante Erscheinung, welche in schwacher Andeutung aber nur für sehr kurze Zeiträume auch bei grösseren Funkenstrecken beobachtet wurde, ist hier so stark ausgeprägt, dass die durch eine vorausgehende Entladung hervorgerufene Leitfähigkeit des kleinen Zwischenraumes ohne äussere Beeinflussung durch Erschütterung oder Temperaturänderung eine dauernde zu sein scheint, da sie nach der Beobachtung einige Stunden lang anhält. Wie ausgeprägt dieselbe ist, geht daraus hervor, dass ein Zwischenraum der anfänglich erst durch eine Spannungssteigerung auf etwa 300 Volt durchbrochen werden konnte, nachher von einem Element bezwungen wurde.

Über die geringen Spuren von Leitvermögen fester und flüssiger Dielektrika, welche man nach dem Vorausgehenden auch als Grade der Porosität in elektrischer Beziehung auffassen könnte, siehe in H. I, 2 unter elektrischer Leitung.

3. Wechselwirkung zwischen elektrischer Spannungsenergie und mechanischer Energie.

133. **Bewegungswiderstände grösser als der Feldzwang.**

Nach der bisher benutzten Auffassung des elektrischen Feldes als Raumgebiet, welches sich in einem Zwangszustande befindet, der in zweifacher Hinsicht nach „Entspannung“ strebt (vgl. **118**), müsste bei „Isolierung“ der im elektrischen Felde aufgespeicherten Spannungsenergie sowohl in elektro-dynamischer Beziehung (Entladung durch Strombildung), als auch in elektro-mechanischer Beziehung (Umsetzung in mechanische Energieform durch Annäherung der Grenzflächen mit dem Sitz der Ladung) doch das Bestreben der mechanischen Annäherung in ähnlicher Weise nachweisbar sein, wie die bleibende elektrische Druckdifferenz. Die Forderung der FARADAY-MAXWELLschen Auffassung, dass jedes feste Dielektrikum zwischen zwei elektrisch geladenen Belegungen eine mechanische Druckbeanspruchung durch die letzteren erfährt, sowie auch in seinem Inneren molekulare Spannungszustände aufweist, ist auch nachträglich als eine weitere Stütze jener Auffassung experimentell nachgewiesen worden und zwar in zweifacher Hinsicht: einmal direkt in Gestalt der sogenannten Elektrostriktion, ein zweites Mal indirekt aus der im elektrischen Felde beobachteten Doppelbrechung gewisser Dielektrika, z. B. Glas, welche nachweislich durch Verschiedenheit des mechanischen Druckes nach verschiedenen Richtungen verursacht wird.

a) Elektrostriktion und Doppelbrechung im elektrischen Felde.

Nach den Ableitungen auf MAXWELLscher Grundlage (siehe **136** sowie **119**) findet im elektrischen Feld für $l = 1$ und $q = 1$ eine mechanische Einheitsspannung F_1 des Dielektrikums sowohl in Richtung der elektrischen Kraftlinien als auch senkrecht dazu statt, welche durch die Gleichung

$$F_1 = \frac{\varkappa}{8\pi} \cdot E^2$$

gegeben ist, wenn $\varkappa$ die Dielektrizitätskonstante, E die elektrische Spannung bezeichnet.

Unter Berücksichtigung der elastischen Deformation ist diese Theorie der Druckkräfte später durch KORTEWEG, BOLTZMANN, v. HELMHOLTZ, LORBERG und KIRCHHOFF vervollständigt worden (vgl. Wk. III a, 100). Die durch jene mechanischen Kräfte verursachten Gestalts- und Volumenänderungen, Erscheinungen, welche jetzt unter dem Namen Elektrostriktion zusammengefasst zu werden pflegen, waren zwar bereits (1831) von FONTANA, später von VOLPICELLI (1856) und GOVI (1866) gelegentlich beobachtet worden, jedoch erst nach MAXWELL wurden sie bewusst durch DUTER (1871), am eingehendsten aber durch QUINCKE (1880, WIED. Ann. 10, 191, sowie 1883, WIED. Ann. 19, 545) experimentell untersucht. So wurde z. B. bei englischem Flintglas in Form eines kugelförmigen „Thermometerkondensators“ folgende Volumenvergrösserung δV des Hohlraums V_0 abhängig von der Spannung E beobachtet:

Ungefähre Spannung E in Volt	3900	6900	10 000	13 200	16 200	19 200
$\frac{\delta V}{V_0} \cdot 10^6$	0·52	1·72	3·72	4·93	9·77	14·74

Die Verzögerungserscheinung, dass nach langer Einwirkung elektrischer Kräfte das Volumen oft noch zunahm, wenn am Elektrometer schon eine Abnahme von E zu beobachten war, dürfte wohl mit der Rückstandsbildung zusammenhängen (siehe **125**).

Die Verlängerung von Glasfäden beim Elektrisieren wurde gleichfalls durch QUINCKE, diejenige von vulkanisiertem Kautschuk durch RÖNTGEN (1880, WIED. Ann. 11, 786) nachgewiesen. Die beobachteten Volumänderungen von Flüssigkeiten bedürfen zum Teil noch der weiteren Bestätigung, namentlich auch was die Eindeutigkeit ihrer Abhängigkeit von der Elektrisierung anlangt. Gase zeigen keine „elektrische Volumveränderung“.

Die in das Gebiet der Optik hinüberleitende Erscheinung der Doppelbrechung dielektrischer Substanzen im elektrischen Felde wurde zuerst 1875 und am ausgedehntesten von KERR (vgl. Wk. III a, 104) untersucht. Hierbei werden nach KERR zwei Arten von Doppelbrechung unterschieden: positiv, wenn das Dielektrikum im elektrischen Felde in Richtung der elektrischen Kraftlinien gedehnt erscheint, wie Glas, Bernstein, Paraffin, flüssiger Schwefel, Wasser u. s. f.; negativ, wenn die Dehnung quer zu den Kraftlinien verläuft, wie Talg, Stearinsäure, Äther u. s. w. Näheres über die bei starker Durchleuchtung des Feldes gut sichtbar werdenden Erscheinungen vgl. WIED. II, 213 bis 223.

Geht man von den Verhältnissen, bei welchen die Bewegungswiderstände grösser als jener mechanische Antrieb vorausgesetzt ist, sodass dieser

Antrieb nur durch mechanische Spannung (Elektrostriktion) nachweisbar wird, über zu der Wechselwirkung zwischen dem dielektrischen Zwang und der mechanischen Bewegung, so erscheint mit Hinsicht auf die elektrische Spannungsenergie als die höhere zunächst die Haupttrennung der verschiedenen Erscheinungen in zwei Unterabteilungen entsprechend Entladung und Ladung geboten (vgl. **118**).

Ist jener stets vorhandene elektro-mechanische Antrieb stärker als die sich der Bewegung entgegensetzenden Reibungs- oder auch Festigkeitswiderstände in Verbindung mit etwaigen anderen mechanischen Gegenkräften, so wird er eine Bewegung der geladenen Grenzflächen oder eine Umlagerung der Ladungsträger veranlassen, also vom energetischen Standpunkt aus dielektrische Spannungsenergie in die tiefer stehende Form der mechanischen Energie überführen.

Ist hingegen eine von aussen auf das elektrisch gespannte System wirkende mechanische Kraft vorhanden, welche die Grenzflächen bezw. Körper den aus dem dielektrischen Zwang resultierenden Antrieb entgegen bewegt, also von solcher Grösse, dass sie um mehr als die etwaigen mechanischen Bewegungshindernisse jenen Antrieb übertrifft, so wird das umgekehrte stattfinden, d. h. eine Hebung von mechanischer Energie in die höhere Form der dielektrischen Spannungsenergie erfolgen.

b) Durch das elektrische Feld veranlasste Bewegungserscheinungen (ponderomotorische Wirkungen).

133. Coulombs Resultate und Punktgesetz.

Es liegt auch hier in der geschichtlichen Entwickelung sowie den natürlichen Verhältnissen begründet, dass die Bewegungserscheinungen elektrisch geladener Körper zuerst im gasförmigen Dielektrikum, besonders Luft, beobachtet wurden, sowie auch die eingehendste Untersuchung fanden. Im geschichtlichen Teil wurde bereits diese Wirkung als die erste überhaupt bewusst beobachtete elektrische Erscheinung erwähnt (vgl. **1**), sowie weiterhin der ausserordentlich grosse Einfluss, den die Untersuchungen von Coulomb (vgl. **8** und **59**) auf die spätere Entwickelung der Elektrophysik nahmen. Erst sehr viel später wurden auch andere offenbar auf die gleiche Ursache zurückzuführende Bewegungserscheinungen beobachtet, wie die weiter unten erwähnten Bewegungen von suspendierten festen Teilchen in Flüssigkeiten oder Rotationen fester Körper unter dem Einfluss des elektrischen Feldes.

Der Umstand, dass das Hauptgesetz von Coulomb die Grundlage des noch jetzt giltigen absoluten Masssystems und damit auch den Ausgangspunkt unserer technischen Masseinheiten bildet (vgl. Bd. II), verleiht demselben auch für die Technik eine solche Bedeutung, wie sie ihm auf Grund der weiter fortgeschrittenen Erkenntnis sonst wohl nicht erhalten geblieben wäre.

Coulomb untersuchte die Gesetze für die Erscheinungen der vorher vielfach, aber nur qualitativ beobachteten elektrostatischen Anziehung und Abstossung mit Hülfe der Drehwage (vgl. Fig. 1 in **8**).

Die Messung des mechanischen Antriebes zwischen der feststehenden Standkugel und der frei beweglichen Kugel, die zur Eliminierung der Schwerkraftwirkung ausbalanciert war, erfolgte durch Kompensation mittels einer mechanisch gut messbaren Torsionskraft, soweit wenigstens die Vergleichung von verschiedenen Kraftwirkungen mit Hülfe von Torsionsgraden

in Frage kam. Die unter dem Einfluss der elektrischen Kräfte eingeleitete Bewegung der freien Kugel wurde hierbei ganz oder teilweise wieder rückgängig gemacht unter gleichzeitiger Messung der erforderlichen Torsionskraft, um die hinzugetretenen elektrischen Kräfte zwischen den beiden Kugeln abhängig von der Entfernung dem Kugelmaterial oder sonstigen Variationsmöglichkeiten zu erkennen.

Die von COULOMB gefundenen Resultate ergaben, dass

1) die Elektrizitätsverteilung auf den Körpern unabhängig von ihrem Stoff ist; gefolgert wurde dies aus dem Umstand, dass bei Berührung eines elektrisierten Körpers (Kugel) mit einem ihm kongruenten aus beliebigem, aber hinreichend leitenden Stoff die als „Elektrizitätsmenge" bezeichnete Quantität Q, welche bei jedem vorher elektrisierten Leiter — hinreichende Isolation vorausgesetzt — unverändert bleibt, sich zwischen jenen beiden kongruenten leitenden Oberflächen im Moment der Berührung in zwei gleiche Hälften teilt. Bewiesen wurde das letztere wieder durch die völlig gleich grosse Kraftwirkung von demselben Vorzeichen, welche diese beiden Teilquantitäten auf dieselbe bewegliche elektrisierte Prüfkugel in der gleichen Entfernung ausübten. Hieraus ergab sich weiterhin, dass bei Gleichheit, das ist kongruenter leitender Oberfläche von Standkugel und beweglicher Kugel die Elektrizitätsmengen auf beiden nach vorausgegangener Berührung auch gleich gross sein mussten, so dass sich nunmehr die Abhängigkeit der Abstossung gleichnamig elektrisierter Kugeln von der Entfernung ihrer Mittelpunkte bestimmen liess. Diese Messungen führten mit hinreichender Annäherung zu dem Resultat, dass

2) der Antrieb zwischen zwei gleichen Elektrizitätsmengen mit dem Quadrat der Entfernung (l) zwischen den Centren abnimmt. Da weiterhin nach den unter 1) angeführten Erfahrungsthatsachen die Elektrizitätsmenge einer oder beider Kugeln durch einmalige Berührung mit einer kongruenten unelektrischen Kugel auf die Hälfte $\left(\frac{Q}{2}\right)$, durch nochmalige Wiederholung dieses Manövers auf ein Viertel $\left(\frac{Q}{4}\right)$ ihres ursprünglichen Betrages gebracht werden kann, so war auch der Einfluss der Elektrizitätsmenge m_1 bezw. m_2 beider Kugeln auf die Antriebsgrösse bestimmbar, was zu dem Ergebnis führte, dass

3) der Antrieb bei gleicher Entfernung direkt proportional mit der Elektrizitätsmenge jeder der beiden Kugeln zunimmt. Die Versuchsbedingungen hatten also zur Aufstellung eines Punktgesetzes für den elektromechanischen Bewegungsantrieb geführt, d. h. eines Gesetzes mit Benutzung des Begriffs der Elektrizitätsmenge und Ersetzung der räumlichen Verteilung durch den elektrischen Schwerpunkt. Die Übereinstimmung dieser Formulierung $\left(f = \frac{m' \cdot m''}{l^2}\right.$ vgl. in 8$\left.\right)$ mit NEWTONS Gravitationsgesetz hatte zwar den grossen Vorteil, dass eine grosse Reihe von Problemen mathematischer Natur eine gemeinschaftliche Behandlung zuliess, so namentlich später die gemeinsame Benutzung des Hülfsmittels der Potentialtheorie, andererseits aber den schwerwigenden Nachteil einer suggestiven Beeinflussung des ganzen elektromagnetischen Gebietes durch die mechanisch unfassbare Fernwirkungsauffassung der Gravitationserscheinungen (59). Eine Folge dieser einseitigen Analogieschlüsse war die auffallend lange Dauer des Übersehens (vgl. 7) eines von

Coulomb gar nicht in Erwägung gezogenen Momentes bei jenen elektrischen Antriebserscheinungen, nämlich die Möglichkeit einer aktiven Beteiligung des Zwischenmediums in Verbindnng mit einer Abhängigkeit der Antriebsgrösse von dem Stoff desselben.

Die Ergänzung dieser Erfahrungsseite macht zunächst die Hinzufügung eines auf das Zwischenmedium bezüglichen Faktors zu der obigen Antriebsgleichung notwendig. Abgesehen von einem bestimmten Masssystem und dem hierdurch bedingten Zahlenfaktor, würde also für ein Medium mit der Dielektrizitätskonstanten $\varkappa$ die Kraftwirkung (Antrieb f) zwischen den Trägern der Elektrizitätsmengen m' und m'' durch

$$f = \frac{1}{\varkappa} \cdot \frac{m' \cdot m''}{l^2} \quad \ldots \ldots \ldots \quad (1)$$

gegeben sein.

134. **Punktgesetz, Liniengesetz und Flächengesetz.**

Die Betrachtung dieser Erscheinungen nach der neueren Auffassung ist zum grössten Teil bereits in **111ff.** gegeben und bedarf nur noch einiger Erweiterungen.

Was zunächst die unter 1) erwähnte Elektrizitätsverteilung zwischen zwei sich berührenden Leitern bezw. die Mitteilung der Ladung eines Leiters an andere betrifft, so kann diese Erscheinung allgemeiner folgende Formulierung erhalten:

Berühren sich zwei leitende Oberflächen mit abweichender elektrischer Spannung, wobei die eine natürlich auch den Wert Null haben kann, so findet zwischen ihnen ein elektrischer Ausgleich statt bis Gleichheit der elektrischen Spannung eingetreten ist (siehe hierzu die Unterscheidung in elektrische und dielektrische Spannung in **109**). Für die alsdann vorhandene Ladung der Oberflächenteile ist ihr Kapazitätswert gegenüber der korrespondierenden Leiterfläche (Belegung) massgebend, sei es, dass diese durch die Erde oder durch andere Leiter gebildet wird. Bei dem Vorgang des elektrischen Ausgleichs wird die elektrische Verschiebung (Strömung) auf den sich berührenden Oberflächen ihren Rückschluss oder ihre Kreislaufergänzung im Dielektrikum finden. Dieser früher fälschlicherweise als „ungeschlossener elektrischer Strom" bezeichnete Vorgang wird bereits zu den im folgenden Kapitel zu betrachtenden elektrischen Ausgleichvorgängen hinüberleiten, insofern er eine kurzdauernde, teils aus Leiterstrom, teils aus dielektrischem Verschiebungsstrom zusammengesetzte Kreisströmung in einer Bahn mit variablem Querschnitt darstellt. Die nach dem Ausgleich vorhandenen dielektrischen Spannungsverhältnisse hängen ausser von der Grösse der resultierenden elektrischen Spannung $\left(E = \frac{Q}{C}\right)$ von der Form des Leiters und seiner Lage gegenüber der korrespondierenden Leiterfläche ab. Q bezw. C bedeuten in jedem Falle die konstant bleibende Gesamtladung bezw. die zugehörige (veränderliche) Kapazität (vgl. hierzu **118**).

Wie bei jedem von selbst erfolgenden Ausgleichvorgang ein energetisches Sinken eintritt, so ist auch hier mit dem elektrischen stets eine Minderung des dielektrischen Gesamtzwanges unter Überführung der dielektrischen Spannungsenergie in tiefere Formen (magnetische Feldenergie, Wärme) verbunden.

Der Begriff der Elektrizitätsmenge Q (der energetische Quantitätsfaktor), ist nach den früher (65) erwähnten Hülfsvorstellungen durch die Verschiebungs-

menge $q_0 \cdot \lambda_0$ gegeben, wenn q_0 den Grenzflächenquerschnitt (Oberfläche des zunächst gleichförmig elektrisiert gedachten Körpers) bedeutet und λ_0 die bei q_0 vorhandene Grösse der dielektrischen Verschiebung (Elongation jedes Punktes der elastisch verschoben gedachten Grenzfläche zwischen frei beweglichen und elastisch festgehaltenen Friktionsteilchen). Die im Dielektrikum bei Inkompressibilität der letzteren sich fortsetzende Verschiebung mit gleichem Gesamtbetrage wird sonach mit dem an der Verschiebung beteiligten dielektrischen Querschnitt q proportional abnehmen. Erfolgt die Ausbreitung der Verschiebung auf konzentrisch sich erweiternden Kugelschalen, wie bei der COULOMBschen Abstraktion, so nimmt λ mit $\frac{1}{l^2}$ ab, wenn l die wachsende Entfernung (Radius der konzentrischen Kugel). Die in einem beliebigen Raumelement vorhandene Verschiebung λ wird in Verbindung mit dem das Raumelement erfüllenden Dielektrikum von der Dielektrizitätskonstanten $\varkappa$ (Dehnbarkeit der elastischen Membranen bei den Hülfsvorstellungen, vgl. **65**) die Grösse des örtlichen dielektrischen Zwanges zu $\frac{\lambda}{\varkappa}$ angeben, d. h. ein Mass für die sogenannte elektrische Feldstärke (vgl. B_{el} in **113**), und die mit $\frac{\lambda_0}{\varkappa}$ proportionale Spannkraft wird ein Mass sein für die Ladespannung E_0 (der energetische Intensitätsfaktor). Die Intensität dieses Zwanges wird sonach an der Grenzfläche am grössten sein, und die Möglichkeit der Zwangsminderung durch Vergrösserung von q_0 oder der Kapazität C wird die oben unter 1) erwähnte Übertragung und Verteilung der vorher unter höherer Spannung befindlichen „Elektrizitätsmenge" erklären, wenn durch Berührung mit einer anderen leitenden Oberfläche die relative Zerstreuung unter gleichzeitigem Herabsinken hinsichtlich der Spannung E_0 bezw. $\frac{\lambda_0}{\varkappa}$ an der Grenzfläche eintritt; gleichzeitig wird die Unabhängigkeit vom Material des leitenden Berührungskörpers erklärlich.

Jede in Spannung befindliche Elektrizitätsmenge strebt also nach möglichster Expansion oder Zerstreuung, da hierdurch der Zwang des elektrischen Feldes in seiner Gesamtheit eine Verminderung erfährt — ein der Wärmezerstreuung entsprechendes „Entropie"-Bestreben, dem durch möglichste Isolierung entgegengearbeitet wird.

Wird das elektrische Feld eines geladenen isolierten Körpers, z. B. der Elektrizitätsmenge m' (des feststehend gedachten Körpers) mit dem Felde einer zweiten Ladung m'' (der beweglichen Kugel) in Kontrast gebracht, so wird der durch diese Übereinanderlagerung entstehende und als Feldstörung erscheinende Summen- bezw. Differenzzwang jetzt neben dem Zerstreuungsbestreben jeder Einzelladung für sich einen Antrieb zwischen den Einzelladungen als Ganzen, also ihren Trägern, verursachen. Der Sinn dieses Antriebes wird wiederum aus der Verkleinerung des Gesamtzwanges folgen und sonach durch das Zerstreuungsbestreben bezw. die Kapazitätsvergrösserung des Systems — in Verbindung mit dem Sinken von E bezw. $\frac{\lambda}{\varkappa}$ — verursacht bei gleichsinnigen Ladungen in Abstossung bestehen, bei entgegengesetzten Ladungen in Anziehung.

Die Grösse dieses Kontrastes oder des aus seinem Minderungsbestreben erwachsenden Antriebes wird bedingt auf der einen Seite durch den von m' herrührenden Wert von $\frac{\lambda'}{\varkappa}$ (elektrische Feldstärke von m'), auf der anderen

durch die von m'' angestrebte Verschiebung. Handelt es sich um den Antrieb, den der Träger von m'' erfährt, so sind demnach alle differentiellen Antriebe zu integrieren; es ist also $q_0'' \cdot \lambda_0'' = m''$ mit dem Wert $\frac{\lambda'}{\varkappa}$ zu multiplizieren, so dass unter Einführung der Masssystemkonstanten c

$$F_\nu = c \cdot \frac{\lambda'}{\varkappa} \cdot m'' \quad \dots \dots \dots \quad (1a)$$

und

$$\lambda' : \lambda_0' = q_0' : q' = l_0^2 : l^2, \quad \dots \dots \quad (2)$$

wenn l den Abstand vom Mittelpunkt des Feldträgers von m' bezeichnet. Da

$$m' = q_0' \cdot \lambda_0', \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

so folgt

$$\lambda' = \lambda_0' \cdot \frac{l_0^2}{l^2} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\lambda_0' q_0'}{l^2} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{m'}{l^2}. \quad \dots \dots \quad (2a)$$

Bei Definierung der Elektrizitätsmenge (Magnetismusmenge) aus der Antriebseinheit wie bei Coulomb folgt also für alle nach Art von λ gebildeten Grössen oder deren Ableitungen das Hinzukommen des Faktors 4π.

In der Formulierung $F_\nu = \frac{1}{\varkappa} \cdot m' \cdot \frac{m''}{l^2}$ sind beide aufeinander wirkenden Elektrizitätsmengen punktförmig konzentriert gedacht, so dass m' für sich am Mittelpunkt des mit der Elektrizitätsmenge m'' geladenen und beweglich gedachten Massenkügelchens die elektrische Feldstärke $\frac{m'}{l^2}$ hervorruft, wenn der Träger von m' eine gegenüber l relativ punktförmige Gestalt besitzt oder nach zwei aufeinander senkrecht stehenden Richtungen von m'' aus unter einem Gesichtswinkel erscheint, der praktisch Null ist.

Dieses abstrahierte Punktgesetz gilt aber nur für relativ grosse Entfernungen gegenüber kleinen Durchmessern der geladenen Körper. Für den Übergang von dieser Abstraktion Coulombs zur Formulierung des Linien- und Flächengesetzes, ein Übergang, der bei den elektromagnetischen Beziehungen in ganz analoger Weise erfolgt, sei Folgendes bemerkt:

Nähert sich die Gestalt des Feldträgers von m' einer hinreichend langen Geraden, wie z. B. bei einer gespannten Leitung, so dass er von m'' aus gesehen nach dieser Ausdehnungsrichtung unter dem Augenwinkel $\pi = 180^0$ erscheint, während dazu senkrecht dieser Wert, wie vorher, sich dem Wert Null nähert, so sind die Flächen gleicher Spannung im Dielektrikum jetzt nicht mehr konzentrische Kugeloberflächen, sondern konzentrische Cylinderoberflächen. Für die Verschiebungsmenge $q_0' \cdot \lambda_0'$ (Elektrizitätsmenge) jeder Längeneinheit des angenähert linienförmigen Trägers von m' erfolgt die Ausbreitung wiederum umgekehrt proportional q, somit nimmt λ' bezw. die Feldstärke $\frac{\lambda'}{\varkappa}$ von m' hier nicht mehr proportional mit $\frac{1}{l^2}$, sondern mit $\frac{1}{l}$ ab. Der Antrieb auf den angenähert punktförmigen Träger von m'' nimmt also mit der einfachen Entfernung ab; homogenes Dielektrikum vorausgesetzt war die Richtung dieses Antriebes bei punktförmigen Feldträgern diejenige der Verbindungsgeraden von m' nach m'', welche die Symmetrieachse für das elektrische

Kraftlinienfeld bildet; hier ist dies die kürzeste Verbindungsgerade, also die Senkrechte von m'' auf den linienförmigen Träger von m'. Besitzt an der Oberfläche des Feldträgers von m' die Verschiebung λ_0' bezw. der Feldzwang $\frac{\lambda_0'}{\varkappa}$ denselben Wert wie vorher beim kugelförmigen Träger, so besteht jetzt die Gleichung:

$$\lambda' = \lambda_0' \cdot \frac{l_0}{l} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\lambda_0'}{l} \cdot 2\pi\, l_0 = \frac{1}{2\pi}\, \frac{\lambda_0'}{l} \cdot q_0'. \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

Bezeichnet man die Ladung pro Längeneinheit des Feldträgers ($L_0 = 1$) durch $m_1' = \lambda_0'\, q_0'$, also

$$\lambda' = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{m_1'}{l} = \frac{2\, m_1'}{4\pi \cdot l}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

so folgt auf Grund der obigen Betrachtung über den Zusammenhang des Antriebes F mit λ' und m''

$$F_l = \frac{\lambda'}{\varkappa} \cdot m'' = \frac{2}{\varkappa}\, \frac{m_1' \cdot m''}{l} = \frac{2}{\varkappa} \left(\frac{m'}{L_0}\right) \cdot \frac{m''}{l}, \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

wobei l und L_0 in denselben Einheiten, z. B. cm, zu messen sind. Hierbei ist l hinreichend gross gegenüber dem Radius des cylindrischen Trägers und hinreichend klein gegenüber dessen Länge L_0 vorausgesetzt. Dieses hier bei den elektrischen Feldern weniger wichtige Liniengesetz spielt bei dem ganz analogen Fall der magnetischen Felder — Feld eines stromdurchflossenen Leiters in Kontrast mit einem Magnetpol — eine um so wichtigere Rolle (vgl. **23**).

Bei dem Punktgesetz, giltig für einen gegenseitigen Gesichtswinkel (von einem Feldträger zum andern), mit dem Wert praktisch Null nach allen Richtungen kommt die ganze Ladung m' für den Antrieb auf m'' ins Spiel: bei dem Liniengesetz mit dem Gesichtswinkel π in nur einer Richtung ist die Ladung der Längeneinheit ausschlaggebend; bei immer grösserer Annäherung von m'' an m' und damit in Verbindung beim Anwachsen des Gesichtswinkels auch nach den übrigen Richtungen findet für die Antriebsverhältnisse eine immer grössere Annäherung an das Flächengesetz statt. Als Grenzwert haben hierbei die Verhältnisse zu gelten, dass m' auf einer so grossen Fläche verteilt ist, bezw. m'' so nahe an den Träger von m' herangerückt ist, dass der Gesichtswinkel von m'' nach den Enden des letzteren nach jeder Richtung den Wert π praktisch erreicht. Alsdann wirkt nur noch die spezifische Ladung der Fläche, d. h. $\lambda' = \lambda_0'$, und der Antrieb auf die wie bisher punktförmig konzentriert gedachte Ladung m'' ist für den Bereich des praktisch homogenen Feldes von m' ganz unabhängig von der Entfernung l zwischen m'' und m'. Innerhalb dieser Grenzen wird also für c als Masssystemfaktor

$$F_{fl} = c \cdot \frac{\lambda'}{\varkappa} \cdot m'' = c \cdot \frac{\lambda_0'}{\varkappa} \cdot m''. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7)$$

Bezeichnet man die Ladung des dem m'' gegenüberliegenden Flächenelementes mit m_1', so folgt für das nach Coulomb definierte Masssystem ($c = 1$):

$$F_{fl} = \frac{m_1'}{\varkappa} \cdot m'' = \frac{1}{\varkappa} \cdot \frac{m'}{q_0} \cdot m''. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7\,b)$$

135. Feldenergie als Oberflächen- und Raumintegral.

Bei Vergleich der drei Formulierungen, welche drei Grenzfälle darstellen, denen sich die wirklichen Verhältnisse mehr oder weniger nähern, erkennt man, dass auf die Gesamtladungen m' mit gleichmässiger Verteilung bezogen die Dimensionen die gleichen bleiben. Als Hinüberleitung zu den früher üblichen Bezeichnungen ergiebt sich, dass die dielektrische Verschiebung λ_0', welche im letzten Fall den von m' ausgehenden Antriebsfaktor unabhängig von der Entfernung bestimmt, die früher als „elektrische Dichte" bezeichnete Grösse ist. Denkt man sich an Stelle von m'' die Einheit der Elektrizitätsmenge gesetzt und als Medium Luft oder allgemeiner ein Gas, dessen Dielektrizitätskonstante ($\varkappa$) praktisch gleich der Einheit, so ergiebt weiterhin die Multiplikation von λ_0' mit 4π (vgl. **134**) ein Mass für die „elektrische Kraft" $F_e = -\frac{dV}{dn}$, worin V die Potentialfunktion von m' und n die Richtung der Kraft, das ist hier der Normalen zur Fläche, so dass $\frac{dV}{dn}$ das Spannungsgefälle im Dielektrikum (vgl. **31**). Bei sehr grosser Nähe, das ist Gesichtswinkel π nach jeder Richtung, gilt also die Beziehung $F = 4\pi \cdot \lambda_0$ ganz allgemein auch für ungleichförmige Verteilung von m' über die Fläche. Weitere theoretische Betrachtungen über das Potential und verwandte Überlegungen siehe MASCART und JOUBERT Bd. I, Kap. 2 und 3, § 18 bis 126; ferner über Korrektionen wegen endlicher Grösse der Radien bezw. kleinerer Abstände gegenüber den Kugelradien, Einfluss benachbarter Massen, wie Schutzkasten u. s. w. vgl. ebenda Bd. II, §§ 800 u. ff.

In Übereinstimmung mit den Ausführungen in **118** ergiebt sich für die dielektrische Volumenenergie unter Benutzung der letzterwähnten Begriffe: Wirkt an einer Stelle im Dielektrikum die maximale elektrische Kraft F_e, so bringt dieselbe die Verschiebung $\lambda' = \frac{\varkappa}{4\pi} F_e$ hervor, da $F_e = 4\pi \cdot \frac{\lambda}{\varkappa}$; wenn die Kraft zur Hervorbringung dieser Maximalverschiebung von 0 bis F_e allmählich angewachsen ist, so ist die von dem elektrischen Flächendruck $F_e' = F_e \cdot q$ (vgl. **68**) geleistete Arbeit allgemein:

$$A = \frac{1}{2} F_e \cdot q \cdot \lambda' = \frac{1}{8\pi} \cdot \varkappa \cdot F_e^2 \cdot q. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8)$$

Denkt man sich das ganze Feld in Energiezellen zerlegt mit dem Querschnitt dq und der längs der Verschiebungslinien und zwischen zwei Niveauflächen eingeschlossenen Höhe dl, so ist der elektrische Flächendruck $F_e \cdot dq$ und die Potential- bezw. Spannungsänderung $dE = F_e \cdot dl$. Die Volumenenergie einer Zelle ist sonach

$$dA_1 = \frac{1}{2} F_e \cdot dl \cdot \lambda' \cdot dq. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8a)$$

Integriert man zunächst längs der Verschiebungslinie, so ist allgemein:

$$dA = \frac{1}{2} E \cdot \lambda' \cdot dq. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8b)$$

Erstreckt sich die Integration einerseits bis ans Feldende, andererseits bis zur Grenzfläche, so giebt dies unter Einsetzung der Ladespannung E_0:

$$dA_0 = \frac{1}{2} E_0 \cdot \lambda_0' \cdot dq = \frac{1}{8\pi} \cdot \varkappa \cdot E_0^2 \cdot dq, \quad . \quad . \quad . \quad (8c)$$

und über die ganze Oberfläche integriert (vgl. **118**) folgt:

$$A = \frac{1}{2} E_0 \cdot \lambda'_0 \cdot q_0 = \frac{1}{2} E_0 \cdot Q = \frac{C}{2} \cdot E_0^2 = \frac{1}{2} C \cdot E_0^2. \quad . \quad (8d)$$

Hier erscheint sonach die Energie als Oberflächenintegral, welches dadurch erhalten wird, dass man durch Einführung der Spannung E eine Integration bereits vorgenommen hat. Löst man dagegen das ganze Feld in einzelne Kraftzellen auf, so erscheint derselbe Energiebetrag A als Raumintegral [vgl. Gleichung (8a) bezw. (8e)]. Ersetzt man in $A = \frac{1}{2} F_e \cdot q \cdot \lambda$ (Gl. 8) die elektrische Kraft F_e durch das gleichwertige $4\pi \frac{\lambda}{\varkappa}$, so folgt als Mass für den Zwang des Feldes oder für die nach Entspannung strebende elektrische Feldenergie auf die Querschnittseinheit ($q = 1$) der Ausdruck $\frac{2\pi}{\varkappa} \cdot \lambda^2$. Dieser Wert bezeichnet zugleich den sogenannten elektrostatischen Druck, welcher das Zerstreuungsbestreben einer elektrischen Ladung angiebt. Diesem nach aussen wirkenden Druck wird zwar durch die Festigkeit des gespannten Dielektrikums das Gleichgewicht gehalten, doch wird ein dehnbarer Feldträger, wie z. B. eine elektrisierte freie Seifenblase oder ein elektrisierter Wasserstoffballon dem nach aussen gerichteten und mit einer Minderung des Gesamtzwanges verbundenen Antrieb teilweise nachzugeben vermögen, d. h. eine Umfangsvergrösserung erfahren (vgl. auch **132**).

Jeder andere bewegliche Körper innerhalb eines elektrischen Feldes wird einen Antrieb elektro-mechanischer Natur stets in dem Sinne erfahren, dass durch seine Bewegung eine Minderung des dielektrischen Zwanges herbeigeführt wird in Verbindung mit der Überführung eines Quantums elektrischer Spannungsenergie in die niedere Form der mechanischen Energie, sei es nun, dass diese zunächst wie oben bei der Seifenblase als mechanische Spannungsenergie (Oberflächenenergie) wiederum aufgespeichert oder durch Beschleunigung der Elektrizitätsträger in Form von lebendiger Kraft (mechanisch-kinetische Energie) übergeführt wird oder endlich durch Aufzehrung bei Überwindung mechanischer Reibungswiderstände noch tiefer auf die Wärmeenergieform herabsinkt. Die Grösse des mechanischen Antriebes wird durch die ein energetisches Sinken darstellende elektromechanische Verwandlungsmöglichkeit gegeben sein. Bezeichnet man den Grad der selbstthätigen energetischen Wandlungsmöglichkeit als energetisches Gefälle, so wird dieses Gefälle für ein Energiesystem, z. B. ein elektrisches System oder noch spezieller für einen beweglichen Teil desselben, z. B. einen beweglichen Körper im elektrischen Felde, für jede mögliche Bewegungsrichtung ein Mass für den mechanischen Antrieb abgeben. Wie man sieht, deckt sich dieser Hülfsbegriff bis zu einem gewissen Grade mit dem Potential. Das mit der mechanischen Bewegung (elektromechanischen Energiewandlung) verbundene energetische Sinken ist nämlich — hinreichende Isolierung ohne Zufuhr neuer Energie in elektrischer Form vorausgesetzt — mit einem Sinken des elektrischen Potentiales oder der Spannung E bezw. des dielektrischen Zwanges einerseits, mit einer entsprechenden Verkleinerung des dielektrischen Widerstandes oder Vergrösserung der reziproken Kapazität, andererseits verknüpft (vgl. **118**), während die als Elektrizitätsmenge (Ladung) bezeichnete elektrische Grösse konstant bleibt.

136. Energetische Auffassung der Elektrometerwirkung.

Alle durch elektrostatische Kräfte veranlassten mechanischen Bewegungserscheinungen einschliesslich der elektrischen Influenzerscheinungen sind auf diese Kapazitätsvergrösserungen des Systems, welche ein energetisches Sinken ermöglichen, zurückführbar sowohl qualitativ als quantitativ. Die quantitativen Bestimmungen sind allerdings nur in bestimmten Fällen mit

hinreichender Genauigkeit zu berechnen, so namentlich, wenn man dafür sorgt, dass die elektrischen Felder, welche für die Berechnung in Frage kommen, hinreichend homogen sind. Eine wichtige Verwendung dieses Falles stellt das absolute Elektrometer von W. THOMSON dar, bei welchem von zwei parallelen elektrisch geladenen Metallflächen (vgl. Fig. 72) der mittlere Teil

Fig. 72.

b der einen soweit beweglich ist, um ihre Anziehung von seiten der zweiten festen (a) durch Gewichte F messen zu können. Das zwischen a und b eingeschlossene dielektrische Raumgebiet (Luft) von cylindrischer Gestalt stellt ein praktisch homogenes elektrisches Feld vor, dessen einzelne Energiezellen einander gleichen (vgl. **112** und Fig. 51). Die Volumenenergie einer Zelle ist nach **135** (Gleichung 8a)

$$dA_1 = \tfrac{1}{2} F_r \cdot dl \cdot \lambda \cdot dq = \frac{1}{8\pi} \cdot \varkappa \cdot F_r^2 \cdot dl \cdot dq. \quad . \quad . \quad (8a)$$

Wegen der Homogenität des Feldes liefert die aufeinanderfolgende Integration

$$A = \int_0^l \int_0^q \frac{1}{8\pi} \cdot \varkappa \cdot F_r^2 \cdot dl \cdot dq = \frac{1}{8\pi} \cdot \varkappa \cdot F_r^2 \cdot l \cdot q, \quad . \quad . \quad (8e)$$

wenn l der Abstand zwischen den Platten und q die gegen a gewendete Oberfläche der beweglichen mittleren Kreisscheibe b ist.

Da $F_r \cdot l$ der Spannung E entspricht oder $F_r^2 = \frac{E^2}{l^2}$, so folgt bei Einführung der elektrischen Spannung E zwischen den Platten die Volumenenergie:

$$A = \frac{1}{8\pi} \cdot \varkappa \cdot \frac{E^2}{l} \cdot q. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8f)$$

Der mechanische Antrieb F wird nach **135** durch die Umwandlungsmöglichkeit von dielektrischer Spannungsenergie in mechanische Arbeit bei der virtuellen Verschiebung von b um dl erhalten, d. h.

$$F = \frac{dA}{dl} = -\frac{\varkappa}{8\pi} \cdot \frac{E^2}{l^2} \cdot q. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (9)$$

Da $\varkappa$ für Luft gleich der Einheit, so kann durch absolute Messung von l in cm und q in cm², sowie Messung des durch Gewichte ausbalanzierten Antriebes F in Dyn bezw. Gramm (981 Dyne), eine absolute Messung der Spannung E erfolgen. In elektrostatischen Einheiten (E_1 = 300 Volt) gemessen, ergiebt sich alsdann

$$E = l \sqrt{\frac{8\pi \cdot F}{\varkappa \cdot q}} \text{ ESE.} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (9a)$$

Beim Konstanthalten der Spannung E und stetiger Verkleinerung von l, also Annäherung der Platten, würde die Anziehung unter stetiger Zufuhr neuer

elektrischer Energie zunehmen und zwar umgekehrt proportional mit l^2. Würde man hingegen den Platten, welche einen variablen Kondensator vorstellen, eine bestimmte Ladung mitteilen, dieselben hierauf isolieren, d. h. Ladung Q aber nicht mehr Spannung E konstant halten, so würde bei zwei gleich grossen gegeneinander bewegten Platten die Anziehung, abgesehen von den Korrektionen wegen der Randpartien, unabhängig von l werden, also konstant bleiben. Die Kapazität nimmt nämlich entsprechend der Annäherung zu, die Spannung E bei der Konstanz von Q ebenso ab, was für F gemäss der obigen Formel einen konstanten Wert des Verhältnisses $\frac{E}{l}$ ergiebt. Die Gegenüberstellung der Verhältnisse einmal bei konstanter Spannung E unter Zufuhr neuer elektrischer Energie von aussen, ein zweites Mal bei konstanter Ladung Q ohne Ergänzung der in mechanische verwandelten elektrischen Energie, zeigt deutlich den verschiedenen Einfluss des Entfernungsfaktors l in der Antriebsgleichung. Der zweite Fall, zwei korrespondierende Plattenladungen, ist auch im Hinblick auf die früheren Betrachtungen über das Punkt-, Linien- und Flächengesetz des Bewegungsantriebes einer als punktförmig gedachten Ladung (m'' vgl. **134**) von Interesse. Während bei der Abstraktion von einer gegenseitigen Beeinflussung des Kapazitätswertes bei dem Punktgesetz die Anziehung für zwei gegensätzliche konstant bleibende Ladungen (vgl. **133**) proportional mit $\frac{1}{l^2}$ sich ergab, bei dem Liniengesetz mit $\frac{1}{l}$, tritt bei dem hier giltigen Flächengesetz Unabhängigkeit von l ein; letzteres natürlich auch nur innerhalb gewisser Grenzen, d. h. genauer für den nie ganz erreichten Grenzfall, dass der Kapazitätswert direkt proportional mit l veränderlich ist (vgl. hierzu Fig. 51 und **114**).

Anders liegen die Verhältnisse, wenn die beiden flächenförmig ausgebreiteten Leiter nicht wie im Fall der THOMSONschen Spannungswage durch Verbindung mit der zu messenden Spannung eine gegensätzliche gleich grosse Ladung erhalten, sondern gleichnamig geladen werden. Das letztere ist nach den Betrachtungen in **111** nur möglich, wenn der andere Pol mit der Erde oder der Umgebung der zu ladenden Leiteroberflächen verbunden wird, sodass die Kapazität zwischen den zwei gegeneinander beweglichen Leitern einerseits, der Erde oder Umgebung, z. B. Gehäuse andererseits eine Aufspeicherung an Spannungsenergie oder eine elektrische Feldbildung ermöglicht. Diese bei den ersten Messinstrumenten, den Elektrometern (vgl. **7**), benutzte Feldbildung verursacht einen mechanischen Bewegungsantrieb, der nach **135** qualitativ und für bestimmte Spannung auch quantitativ durch die Kapazitätsvergrösserung bedingt wird, die durch Eintritt der Bewegung erfolgen würde.

Der Ausschlag der beiderseits beweglichen Strohhalme oder Goldplättchen der älteren Elektrometer beruht ebenso auf einer Vergrösserung ihrer Kapazität gegen die als andere Belegung anzusehende Umgebung, z. B. das Gehäuse, wie der Ausschlag der neueren von F. BRAUN ausgebildeten Elektrometer (vgl. ETZ 1891, 645) mit einem feststehenden und einem zweiten scherenartig gegen jenen beweglichen Teil. Stets führt das Fallbestreben des Systems hinsichtlich der Spannung, das ist das Herabsinken eines Energiebetrages von der elektrisch gespannten Energieform zunächst auf die tiefere Energiestufe der mechanischen Energie eine Bewegung im Sinne der Kapazitäts-

vergrösserung herbei, bis das „Zerstreuungsbestreben“ der Elektrizität durch eine andere mechanische Kraftwirkung kompensiert wird und dadurch zur Messung gebracht werden kann. Hierbei sind immer wieder folgende zwei theoretisch streng auseinander zu haltende Fälle zu unterscheiden:

1) Vor Beginn der Kapazitätsänderung durch Bewegung ist dem System eine begrenzte Menge elektrischer Energie mitgeteilt worden, die durch Abschliessung gegen äussere elektrische Energiequellen (Isolation) keine neue Zufuhr erfährt. In diesem Falle bleibt die Elektrizitätsmenge Q (Ladung oder Quantitätsfaktor) konstant, während bei der mit Kapazitätsvergrösserung verbundenen Bewegung die elektrische Spannung (des Intensitätsfaktors) herabsinkt und hiermit eine entsprechende Menge elektrischer Spannungsenergie durch Verkleinerung des Gesamtzwanges im elektrischen Feld in niedere Energieformen, z. B. mechanische Energie umgewandelt wird.

2) Die beiden gegeneinander beweglichen Systemteile mit veränderlicher Kapazität bleiben dauernd mit einer äusseren elektrischen Energiequelle in Verbindung. Die hinsichtlich ihrer Messgrösse konstant gedachte Spannung an den Enden des Instrumentes wird alsdann das Sinken der Spannung nicht zulassen, sondern durch Zufuhr neuer elektrischer Energie aus der äusseren gleichsam energetisch höher gelegenen Energiequelle die bei der Bewegung (Kapazitätsvergrösserung) neu in das elektrische Feld eintretenden Dielektrikumsschichten in gleicher Stärke wie die anderen spannen (vgl. in **117** und **118**).

Die Bewegungserscheinungen aller übrigen Elektrometer lassen sich auch in ganz ähnlicher Weise entweder auf die wirkliche Verkleinerung des Zwanges im elektrischen Feld bei den unter 1) aufgeführten Fällen oder auf das bei 2) eintretende energetische Sinken des ganzen in leitender Verbindung stehenden Systems einschliesslich der äusseren Energiequelle zurückführen. Dies gilt ebenso für die nach Thomsons Einteilung „idiostatisch“ arbeitenden Elektrometer, d. h. Instrumente bezw. Schaltungsweisen welche nur die Messspannung und keine fremde Hülfsspannung benutzen, als auch für die „heterostatisch“, d. h. mit einer Hülfsspannung arbeitenden, wobei namentlich die (allerdings nur für Gleichspannungsmessungen) verwendbare Schaltung der Quadrantenelektrometer mit getrennt geladener Nadel unter Benutzung einer Wasserbatterie, Zambonischer Säule u. s. w. in Frage kommt.

Auch die übrigen elektrostatischen Messinstrumente, welche auf der Bewegung (Drehung) eines Körpers von verschiedenen Dimensionen (Stäbchen, Platte oder Ellipsoid) im elektrischen Feld beruhen, wenn Feld und Körper verschiedene Dielektrizitätskonstanten besitzen, sind in ihrer Wirkung auf die unter 1) bezw. 2) gekennzeichneten energetischen Fallvorgänge zurückzuführen. Die bereits in **116** näher behandelte Bewegung von Körpern mit höherer Dielektrizitätskonstante im elektrischen Felde, besonders Luft mit $\varkappa = 1$, erklärt daher vollständig die Wirkungsweise der elektrostatischen Messinstrumente, wie sie zur Messung der elektrischen Feldstärke bezw. der elektrischen Spannung zwischen zwei parallelen Platten von H. Hertz, Graetz und Fomm (vgl. **40**), Lombardi (1896, ETZ, 487), sowie Ebert und Hofmann (vgl. **40**) benutzt wurden. Bei ersteren erfolgt die Messung mit Spiegelablesung aus der Drehung eines dielektrischen Körpers (Schellackstäbchen, -platte oder dergleichen mit anfangs parallel zu den Platten gestellter Achse der grössten Ausdehnung) im Felde, bei letzteren aus der Drehung eines Rotationsellipsoides aus leitendem Material (Aluminium) im

Felde. Weiteres über Elektrometrie siehe in H. I, 2, sowie Wied. I, 190 u. ff.)

137. Konvektionsströme aus elektrisch geladenen Massenteilchen.

Die mechanischen Bewegungen elektrisch geladener Körper oder Körperchen im elektrischen Felde bilden eine Erscheinungsgruppe von weit grösserer Ausdehnung als es vielleicht im ersten Moment den Anschein hat. Alle Erscheinungen der sogenannten Selbstentladung von elektrisierten Körpern durch „Abstossung" gleich geladener fester Staubteilchen oder auch gasförmiger Luftteilchen gehören naturgemäss derselben an (vgl. **30**). Erfolgt diese Entladung durch eine grosse und immer wieder erneuerte Zahl derartiger Teilchen, welche die Hauptladung in Gestalt vieler kleiner Teilladungen in einer andauernden fortlaufenden Strömung abführen, so ist durch die letztere der Übergang zu den elektrischen Ausgleicherscheinungen geliefert. Dies gilt sowohl für die gewöhnliche Entladung von begrenzten Elektrizitätsmengen (isoliert geladener Leiter) als auch für Ausgleich zwischen den zwei Enden eines Stromkreises (Elektroden), deren Ladung durch Verbindung mit einer elektrischen Spannungs- bezw. Stromquelle wieder erneuert wird. Derartige durch ponderomotorische Wirkungen veranlassten Bewegungen elektromechanischer Natur bilden nach neueren Anschauungen auch das Wesen aller sogenannten Gasentladungen. Die letzteren hätte man sonach als Verbindungs- und Übergangsglied der in diesem Abschnitt betrachteten Erscheinungen zu den elektrischen Ausgleich- bezw. Stromerscheinungen des folgenden Abschnittes zu betrachten, insofern die Gasentladungen aufgefasst werden als die Folge von ponderomotorisch wirkenden Kräften zwischen einem relativ sehr grossen feststehenden Körper (Kathode und Anode) und sehr kleinen elektrisierten Massenteilchen (den elektrisch beladenen Jonen oder Mikroionen bezw. Elektronen), welche durch den mit mehr oder weniger verdünntem Gas erfüllten Raum von jenen abgeschleudert werden. (Weiteres unter Gasentladungen in H. I, 2). Es sei nur noch kurz angedeutet, dass weiterhin durch die voraussichtlich bestehende nähere Verwandtschaft der Gasentladungsvorgänge mit den elektrolytischen Leitungsvorgängen auch die Überleitung von den bisher betrachteten direkt wahrnehmbaren mechanischen Bewegungserscheinungen — gleichsam einem elektrischem Ausgleich mit grossen Massen Einheiten — zu den unsichtbaren Jonenwanderungen dissoziierter Flüssigkeiten gegeben ist.

Eine Reihe anderer Bewegungserscheinungen im elektrischen Felde wie die Fortführung von suspendierten festen Teilchen in Flüssigkeiten, sowie Rotationen von dielektrischen Körpern (Kugeln) in nahezu isolierenden Flüssigkeiten wurde namentlich von Quincke (1861, Pogg. Ann. 113, 513 und 1896, Wied. Ann. 59, 417 bezw. ETZ 1897, 83) beobachtet. Auch hier ist mit der Bewegung eine Überführung elektrischer Ladung verbunden, welche, wenn auch in weniger einfacher und direkter Weise als in den vorstehend betrachteten Fällen mit einem energetischen Fall verbunden ist. Diese Quincke-schen Rotationen im elektrischen Felde erscheinen nach den neueren Versuchsanordnungen von Grätz und den voraufgegangenen Erklärungen von Heydweiler, Boltzmann und Schweidler (vgl. Grätz 1900, Ann. d. Ph. 1, 530 bezw. ETZ 1900, 312) als Elektromotor-Erscheinungen, wobei die Umdrehungsgeschwindigkeit der Ankerkugel aus hochisolierendem Material (z. B. Schwefel oder Ebonit) im weniger gut isolierenden Medium (z. B. Äther, Benzol, Luft) abhängig von der *elektrischen* Feldstärke und den mechanischen Reibungsverhältnissen (Leerlaufreibung) nach kurzer Zeit sta-

tionär wird. Die Energie liefert die das elektrische Feld erzeugende Spannungsquelle, welche trotz Wegführung elektrischer Ladung durch die rotierende Ankerkugel die Spannung aufrecht erhält (vgl. **116**). Als ein solcher Elektromotor mit drehender Fortführung elektrischer Ladungen (anstatt Ströme) im elektrischen (anstatt magnetischen) Feld kann auch eine umgekehrt benutzte Influenzmaschine (**139**) Verwendung finden, und es kann eine Arbeitsübertragung durch zwei Influenzmaschinen ermöglicht werden (vgl. GRÄTZ a. a. O.). Zur Aufklärung der Bewegungserscheinungen in abgeschlossenen verdünnten Gasräumen dürften die neueren Untersuchungen von HEYDWEILER (1899, WIED. Ann. 69, 521) geeignet sein, wonach in Übereinstimmung mit einer von HERTZ entwickelten Theorie die rotatorischen Bewegungserscheinungen auf die Verschiedenheit der elektrischen Leitfähigkeit zwischen Gas und Gefässwand zurückgeführt werden.

Besonderes Interesse verdient die Heranziehung dieser Rotationserscheinungen zur Bestimmung des elektrischen Leitvermögens verschiedener Medien durch GRÄTZ (a. a. O.), vgl. H. I, 2.

c) Die Umwandlung mechanischer (Bewegungs-) Energie in dielektrische Spannungsenergie.

138. Kondensator, Elektrophor und Duplikator.

Die Umkehrung der in **136** betrachteten Vorgänge, d. h. die Einwirkung einer mechanischen Kraft auf ein elektrostatisches System mit veränderlicher Kapazität, wobei die bewegliche Kondensatorbelegung unter Überwindung des dielektrischen Zwanges dem Antrieb der elektrischen Kräfte entgegen bewegt wird, ist in der einfachsten Form schon von Volta im „Elektrophor“ (1775), sowie dem daraus (1782) entwickelten „Kondensator“ gegeben (vgl. **5**). An jener Stelle wurde aus der Gleichung $E = \frac{Q}{C}$ bereits die Wirkungsweise dieser Apparate hinsichtlich der Steigerung ihrer Spannung E abgeleitet aus der Konstanz der Ladung (Elektrizitätsmenge) Q und der abnehmenden Kapazität C des durch mechanische Bewegung entfernten beweglichen Elektrizitätsträgers. Energetisch folgt aus der Formel für die dielektrische Spannungsenergie A im Felde (vgl. **117** und **135**)

$$A = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} E \cdot Q,$$

das Anwachsen von A entsprechend der Kapazitätsverkleinerung beziehungsweise Spannungssteigerung. Elektromechanisch (vgl. **65**) kann man sich dies am besten in der Weise vorstellen, dass die bei der Bewegung neu eingeschalteten Dielektrikumsschichten gespannt werden müssen. Jedes in das elektrische Feld neu eintretende Raumelement wird also in eine „Energiezelle“ verwandelt. Die Summe der pro Wegelement ds zu schaffenden dielektrischen Spannungsenergie (Potentialvergrösserung) wird ein Mass der jeweils aufzuwendenden mechanischen Kraft F angeben und das Integral $\int F \cdot ds$ den aus mechanischer Arbeit nach der Energiegleichung in dielektrische Spannungsenergie übergeführten Energiebetrag.

Die verschiedenen hierhergehörigen Apparate, von dem einfachen „Kondensator“ VOLTAS bis zur Influenzmaschine beruhen alle auf derselben Grund-

lage: Das durch irgend welche andere Ursachen (meist die reibungselektrische) erzeugte elektrische Feld oder richtiger die in demselben vorhandene dielektrische Spannungsenergie wird durch geeignete mechanische Bewegung auf Kosten der geleisteten mechanischen Arbeit vermehrt oder gleichsam vervielfältigt. Diese bei den einfachsten Apparaten, wie VOLTAS Kondensator mit variabler Kapazität C, nur in gewissen von C abhängigen Grenzen (vgl. Formel) mögliche Überführung von mechanischer Energie in dielektrische Spannungsenergie erfuhr bei den neueren Apparaten, namentlich den Influenzmaschinen, durch Benutzung eines der magnetischen Selbsterregung von Dynamos verwandten Prinzips (der sich steigernden Eigenerregung des elektrischen Feldes) und durch Umwandlung der einfachen mechanischen Entfernung in eine cyklische Bewegung die Weiterentwickelung zu einem Dauerprozess. Was die Wirkungsweise der einzelnen Vorkehrungen betrifft, die vom Standpunkt der neueren Feldauffassung zum Teil prinzipielles und damit indirekt technisches Interesse beanspruchen, so sind die Verhältnisse beim einfachen „Kondensator" im Vorausgegangenen (vgl. **5** und **118**) wohl ausreichend dargelegt.

Der Elektrophor bestehend aus einem — gewöhnlich durch Peitschen mittels eines Fuchsschwanzes negativ elektrisierten — dielektrischen „Kuchen" (Harzmasse), welcher sich in der metallischen „Form" befindet und mit dem gleichfalls leitenden, etwas kleineren beweglichen „Schild" mit Isoliergriff bedeckt wird, weist neben der oben erwähnten „Kondensatorwirkung" des Schildes beim Entfernen auch noch interessante Eigenschaften hinsichtlich der Konservierbarkeit und Erneuerung des elektrischen Spannungszustandes in dem „Kuchen" bezw. auf dem „Schild" auf. Allem Anschein nach spielt die Rückstandsbildung hierbei eine wesentliche Rolle, insofern ein erheblicher Teil der beim Peitschen der Kuchenoberfläche zugeführten hochgespannten negativen Ladung — eigentlich der zwischen Kuchenoberfläche und „Form" als korrespondierender Begrenzung aufgespeicherten dielektrischen Spannungsenergie — durch Rückstandsbildung innerhalb des Kuchens akkumulatorartig aufgespeichert wird (vgl. hierzu **125**), und nur ein allmähliches Zurücktreten an das Schild bezw. Form in Gestalt einer schrittweisen Entladung ermöglicht wird. Der von BEZOLD (vgl. Wk. IIIa, 53) geführte experimentelle Nachweis, dass die Rückseite des Kuchens bei Loslösung von der Form ebenso wie die letztere positiv elektrisch geladen ist, dürfte diese Auffassung stützen, da das scheinbare „Hineinkriechen" der Ladung in die Dielektrikumsschichten völlig den Rückstandserscheinungen entspricht und die länger dauernde bezw. wiederholte Abgabe von Ladung an die metallischen Belegungen erklärt.

Von den sogenannten „Duplikatoren" (vgl. **5**) erklärt die von W. THOMSON angegebene Form des Wassertropfduplikators das Prinzip und die Wirkungsweise derartiger Vorrichtungen am besten. Es bedeute e in Fig. 73 eine mit der Erde leitend verbundene Wasserzuführungsröhre, deren beide Tropfhahnenden c und d innerhalb der entgegengesetzt — wenn auch nur schwach — elektrisch geladenen Rohrstücke A und B sich befinden. Durch „Influenz" wird das positiv geladene A das Ende von c und einen an demselben noch hängenden Tropfen negativ laden, d. h. die von A ausgehenden dielektrischen Verschiebungskanäle (elektrischen Kraftlinien) werden nach dem an c hängenden Wassertropfen als dem hier zunächst gelegenen Teil der zwischen A und B befindlichen Leitermassen ein-

schliesslich Erde, konvergieren und ihm durch ihre Einmündung den Charakter einer negativen Ladung erteilen (vgl. 117). Bei der Trennung wird die letztere erhalten bleiben und die zwischen dem von *c* losgetrennten Tropfen und *A* bestehende Anziehung wird hier von der als mechanische Kraft wirkenden und jener an Stärke überlegenen Schwerkraft überwunden werden. Die ohne elektrische Kraft vorhandene Wirkung der letzteren wird aber hierbei eine Verzögerung bezw. Minderung erleiden, und die hierdurch bedingte mechanische Arbeitsleistung der Schwerkraft wird in elektrische Spannungsenergie übergeführt werden, deren Sitz natürlich wie stets im Felde (im gespannten Dielektrikum) zu suchen ist. Der Wassertropfen erleidet bei seinem Herausfallen aus *A* nämlich eine erhebliche Verkleinerung seines Kapazitätswertes gegenüber *A* als anderer Belegung. Die dadurch hervorgerufene Spannungssteigerung seiner Ladung giebt ein Mass für die aus der mechanischen Arbeitsleistung gewonnene elektrische Spannungsenergie (vgl. Schluss von 132) und wird die Spannung von dem Gefäss *b* bezw. dem damit leitend verbundenen *B* steigern. Da *B* in ganz analoger Weise nur unter Umkehrung der Vorzeichen wirkt, so ist das bei der gegenseitigen Steigerung der Spannung zwischen *A* und *B* verwendete Selbsterregungsprinzip, sowie die — der Leistung nach zwar sehr beschränkte, aber doch beliebig lang fortzusetzende — Abführung von elektrischer Energie ersichtlich. Die Übertragung der Betrachtung auf andere ohne Flüssigkeit, sondern mit bewegten gegeneinander isolierten Metallstücken und Schleiffedern arbeitenden Duplikatoren, namentlich auf den auch von W. Thomson angegebenen und bei seinen Elektrometern verwendenden Füllapparat (replenisher) bietet keine Schwierigkeit.

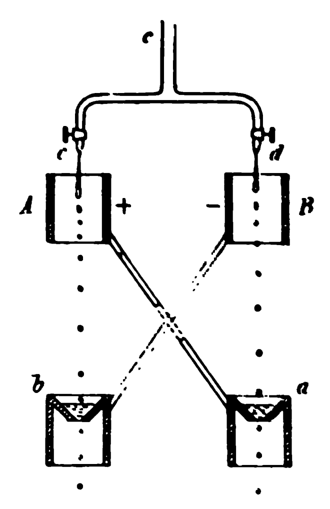


Fig. 73.

Diese Apparate sind aber wegen des gar zu geringen Betrages an umgesetzter Leistung meist nicht geeignet, für Untersuchungen mit Reibungselektrizität ausreichende Mengen elektrisch gespannter Energie zu liefern.

139. Influenzmaschinen. In dieser Hinsicht bot die fast gleichzeitig von Töpler (1865, Pogg. Ann. 125, 469) und von Holtz (1865, Pogg. Ann. 126, 157; 127, 320) gemachte Erfindung der Influenzmaschine einen erheblichen Fortschritt. Die Ausführungen weichen zwar in wichtigen Punkten von einander ab, doch liegt ihnen gemeinsam das Duplikatorprinzip zu Grunde; auch bei den späteren mehrplattigen Ausführungen (1867, Holtz, Pogg. Ann. 130, 287), sowie den zahlreichen anderen Konstruktionen bedingt jenes die Wirkung. Ausführlicheres über diese Konstruktionen findet sich bei Wied. 1, 1115 bis 1162 zusammengestellt, wo namentlich auch eine Übersicht über die zahlreichen Abänderungen, welche alle das gleiche Grundprinzip benutzen, wenn auch in den verschiedensten Variationen und Komplikationen, sowie auch über die dabei als abändernde Konstrukteure beteiligten Experimentatoren gegeben ist (vgl. a. a. O., Anmerk. zu 1141). Von diesen machte namentlich die Konstruktion von Wimshurst (vgl. ETZ 91, 262) einige Zeit viel von sich reden, da sie auch als Wechselspannungsmaschine benutzt werden kann.

Eine spätere Konstruktion von Töpler (ETZ 1880, 56) lässt das Grundprinzip der Duplikatorwirkung gut übersehen: Auf einer feststehenden zweiteiligen Glasscheibe befinden sich gut isoliert von einander die beiden Be-

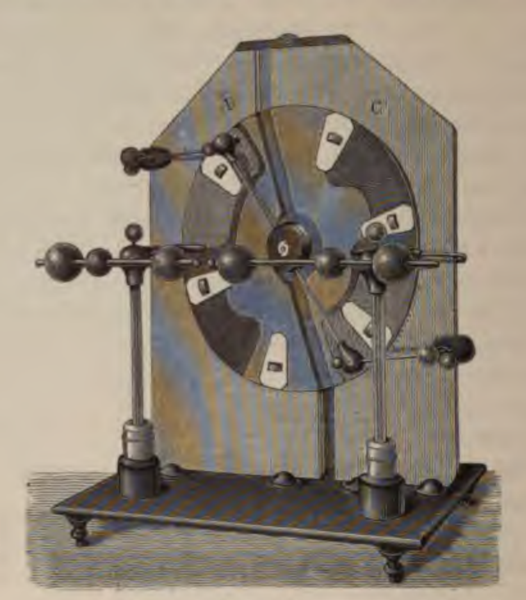


Fig. 74.

legungen *A* und *C* (vgl. Fig. 74), die sogenannten Verteiler. Vor diesen rotiert eine Glasscheibe, auf welcher eine Anzahl — in der Figur sind es 6 — Stanniolblättchen, die sogenannten Übertrager, befestigt sind, jedes der-

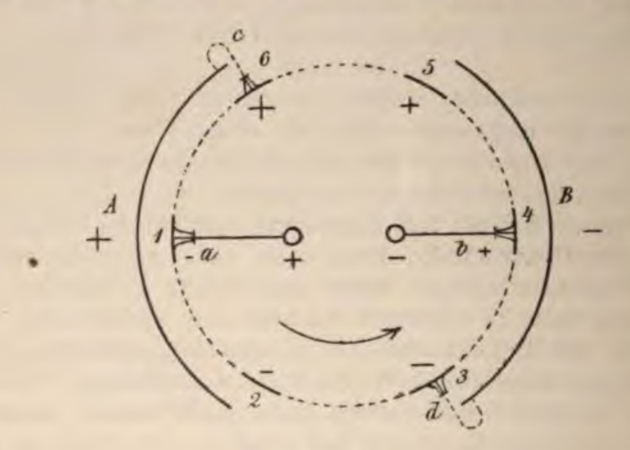


Fig. 75.

selben in der Mitte noch mit einem Stück Messingblech armiert. Über letzteres schleifen die vier gut von einander isolierten Abnehmerbürsten. Die beiden im Horizontaldurchmesser befindlichen, in Fig. 74 nicht sichtbaren, Hauptbürsten *a* und *b* stehen mit der Funkenstrecke in leitender Verbindung; von den zwei am diagonal verlaufenden Halter sitzenden Bürsten ist die

obere links (c) mit der Belegung A, die untere rechts (d) mit der Belegung C verbunden und dienen zur Erregung bezw. Steigerung der von A und C erzeugten elektrischen Felder. Der besseren Übersicht halber sei das Schema der leitenden Hauptteile in konzentrischer Anordnung in Fig. 75 angegeben. Alsdann ist das Spiel der Maschine bei Rotation der Vollscheibe mit den Übertragern 1 bis 6 folgendes: Die Belegung A besitze eine wenn auch schwache einseitige Ladung, z. B. von positiver Elektrizität. Der gerade ins Auge gefasste Übertrager, z. B. 1 wird bei dem Vorbeirotieren vor A in dem Moment der leitenden Berührung mit der Hauptbürste a den Teil einer zusammenhängenden Leiteroberfläche bilden, die eine bedeutend grössere Kapazität besitzt als ein einzelner Übertrager für sich, da die ganze eine Hälfte der Funkenstrecke nebst Kondensatorkugeln oder dergleichen mit ihm leitend verbunden ist. Nach den früheren Betrachtungen (vgl. 117) muss Übertrager 1 unter dem Einfluss des Feldes von A den Charakter eines negativ geladenen Körpers annehmen und nach der Trennung von der Bürste eine einseitig negative Ladung aufweisen. Bei wachsender Entfernung zwischen Übertrager 1 und a und weiterhin zwischen 1 und A wird die Kapazität von 1 abnehmen und seine Spannung entsprechend anwachsen (vgl. 138). Erfolgt die Scheibenrotation für den Beschauer von Fig. 75 entgegen dem Uhrzeigersinn, so wird der Verteiler 1 nach einer Drehung von etwa 135° seit der Lostrennung von a mit der Bürste d und dadurch mit der Belegung B (in Fig. 74 mit C bezeichnet) in Berührung kommen. Wegen der inzwischen sehr hoch gewordenen Spannung von 1 wird der grösste Teil seiner Ladung auf B überfliessen (vgl. 134). Das hierdurch verstärkte Feld von B wird auf den ins Auge gefassten Übertrager von nun an entgegengesetzt wirken wie A und in der Stellung 4 bei leitender Verbindung mit b die in Fig. 75 angedeutete elektrische Verteilung hervorrufen, d. h. den Übertrager nach seiner Lostrennung von b positiv geladen weitergehen lassen. In Stellung 6 wird derselbe infolge der inzwischen erreichten hohen Spannung den grössten Teil seiner Ladung an A abgeben. Das Feld von A wird hierdurch eine Steigerung erfahren, sodass der Vorgang bei der zweiten Umdrehung, mit höherer Anfangsspannung beginnend, mit gesteigerten Werten der Spannung E in den einzelnen Übertragerstellungen verläuft und eine immer weiter gehende Steigerung der Maschinenspannung erzeugt. Der Erregungsvorgang verläuft also ganz ähnlich wie das Anwachsen der Spannung bei einer anlaufenden Dynamo. Auch darin ähneln sich die beiden Vorgänge, dass die zufällig vorhandene geringe Spannungsverschiedenheit (remanente Spannung) zwischen A und B (C in Fig. 74) oder auch die durch Reibung zwischen Pinsel und Übertrager auftretende Spannung zur Erregung ausreicht. Nur wird bei der Influenzmaschine mit Selbsterregung die Polarität unbestimmter sein und jedesmaliger Nachprüfung bedürfen. Als Merkzeichen gelten u. a.: die Art der Einwirkung auf einen Körper mit bekannter Ladung, z. B. ein Streifen Pyroxylinpapier, welches durch Hindurchziehen zwischen den Fingern negativ geladen wird, sonach vom positiv geladenen Konduktor angezogen, vom anderen abgestossen wird: die kleine leuchtende Flamme eines Bunsenbrenners wendet sich dem negativ geladenen Konduktor zu.

Zur Lieferung erheblicherer Elektrizitätsmengen, sodass sogar die Entnahme eines sehr schwachen Dauerstroms aus der Influenzmaschine ermöglicht wird, verwendet man bei den neueren grossen Töpler-Maschinen die Parallelschaltung mehrerer Scheiben (vgl. Fig. 76), von denen 20 bis 60 auf die ge-

meinsame Achse gesetzt werden. Die Leistungsfähigkeit einer solchen Maschine wird etwa durch folgende Zahlen charakterisiert (vgl. Ewers, 1899 Wied. Ann. 69, 167): Eine vierzigplattige Maschine — 20 feststehende und 20 bewegliche Scheiben, letztere von je 30 cm Durchmesser — entwickelte bei acht Umdrehungen in der Sekunde eine Elektrizitätsmenge von $3 \cdot 1 \cdot 10^{-4}$ Coulomb pro Sekunde oder Ampere und zwar ziemlich unabhängig vom Widerstand des äusseren Schliessungskreises.

Die sehr stark von letzterem abhängige Spannung bewegte sich bei jenen Messungen zwischen etwa 3000 bis 6000 Volt. Bei Funkenentladungen sind die Spannungen natürlich ungleich höher.

Trotz der verhältnismässig bequemen Art hohe Gleichspannung zu erzielen, die vielleicht manchem modernen Hochspannungselektrotechniker ver-

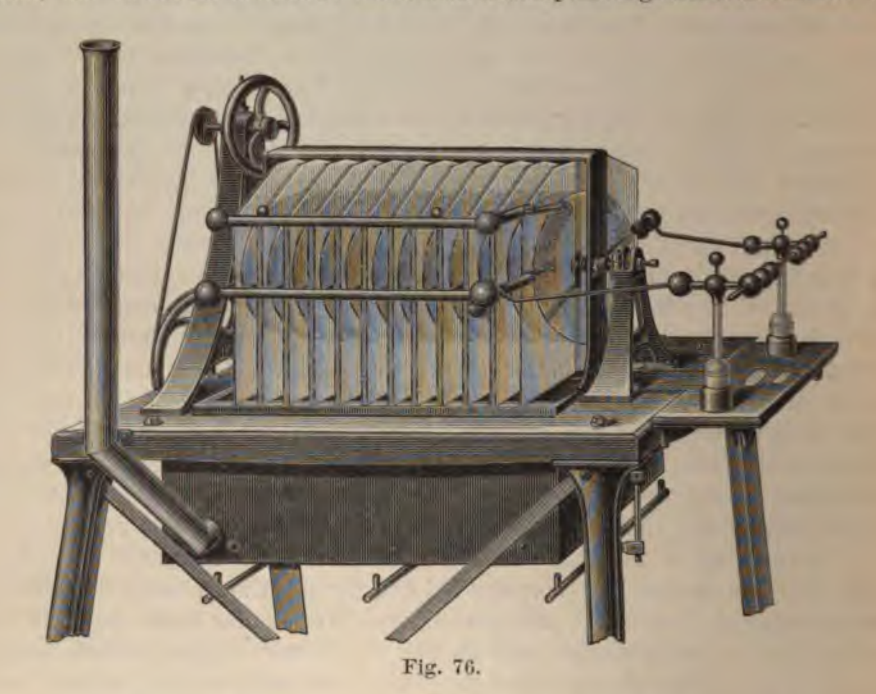


Fig. 76.

lockend erscheinen könnte, ist sonach an eine technische Verwendung dieser Energiewandlung schwerlich zu denken. Abgesehen von den noch vorhandenen Schwierigkeiten eines Dauerbetriebes sind die elektrischen Leistungen viel zu unbedeutend — nach den obigen Zahlen zwischen 1 und 2 Watt, d. h. von der Grössenordnung eines Trockenelementes — und der Umsetzungswirkungsgrad viel zu gering, da er nur wenige Prozente beträgt, während mehr als 90 % in nutzloser Reibung verloren geht, d. h. direkt in Wärme übergeführt wird.

Das Prinzip der Influenzmaschine von Holtz erscheint auf den ersten Anblick durchaus verschieden von dem Prinzip der vorigen, doch ist der Übergang von der einen zur anderen mit wenigen Worten charakterisiert (vgl. hierzu Fig. 77, welche die Ansicht einer sogenannten Holtzschen Influenzmaschine erster Art giebt). Denkt man sich in dem Schema der Fig. 75 die Überträger 1 bis 6 weg, sodass man als rotierenden „Anker" eine völlig unarmierte Glasscheibe (*B* in Fig. 77) erhält, dafür aber die schleifenden Bürstenpinsel

a, *b*, *c*, *d* durch Saugkämme ersetzt, deren Spitzen von der Scheibe ein wenig entfernt sind, so hat man im wesentlichen das Schema für die Hauptteile der Maschine in Fig. 77. Hierbei sind die nur zur Verhinderung der Polumkehr angebrachten Hülfssauger *t* und *v* weggelassen, und es entsprechen sich in Fig. 77 und 75 der Reihe nach die Belegungen *f* und *A*, bezw. *d* und *B*, ferner von den ableitenden Saugkämmen bezw. Bürsten der durch die Aussparung *a* der Fig. 77 hindurchtretende Sauglappen und Bürste *c* in Fig. 75, ebenso Sauglappen durch *b* und Bürste *d*, endlich Saugkamm *g* und Bürste *a*, sowie *i* und Bürste *b*. Die „Übertrager" eins bis fünf der Fig. 75, deren Zahl übrigens beliebig vermehrt werden kann soweit die Spannung es zulässt, werden bei Holtz durch die Segmente der Glasscheibe selbst gebildet. Dieser wesentliche Unterschied, dass hier als Übertragungselement nicht

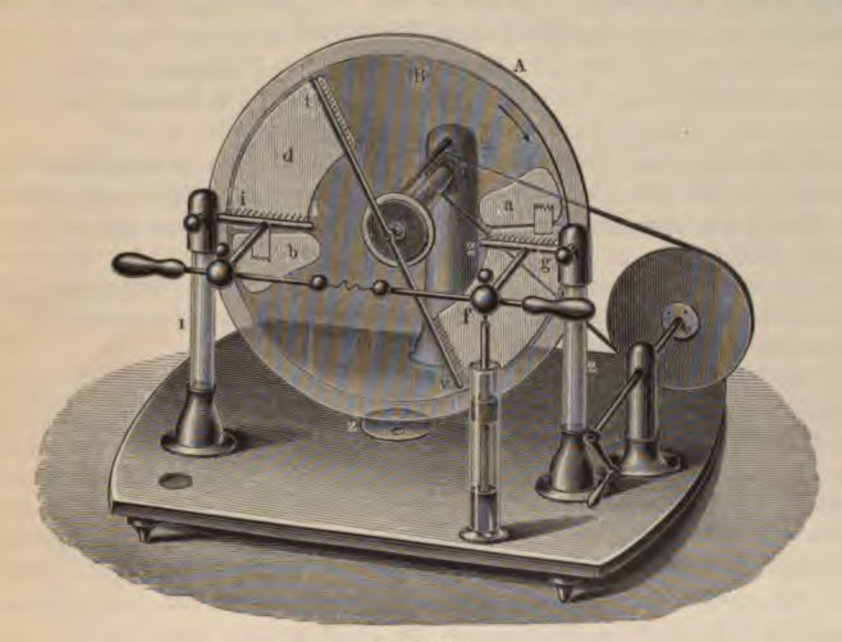


Fig. 77.

von einander isolierte Leiter, sondern das Dielektrikum, z. B. Glas, selbst benutzt wird, also eine einseitige Ladung erhalten muss, bedingt gleichzeitig die Umwandlung der Schleifbürsten in Saugkämme. Schon beim Elektrophor (vgl. **138**) war der Fall vorgekommen, dass ein festes Dielektrikum in einem anderen von abweichender Dielektrizitätskonstante, z. B. Luft, eine Ladung, d. h. an seiner Oberfläche frei bewegliche und übertragbare Elektrizität (Friktionsteilchen) ansammeln kann. Die Beladung einer dielektrischen Schicht, z. B. hier der Glasscheibe, mit freier Elektrizität kann ausser durch unmittelbare Reibung, wie beim Elektrophor, auch durch Influenz mit Hülfe von Spitzenwirkung erfolgen.

Leitende Spitzen als die eine Belegung eines elektrischen Feldes erzeugen in dem begrenzenden Dielektrikum eine so grosse d i e l e k t r i s c h e Spannung bezw. Verschiebung λ, dass bei gasförmigen Dielektricis die dielektrische Festigkeit bezw. Dichtigkeit oft nicht mehr ausreicht, so dass in Gestalt einer beschränkten elektrischen Leitung die Übertragung freier Elektrizität von den

Spitzen aus, bezw. nach ihnen hin stattfindet (vgl. 117). Dieser Fall liegt in Fig. 77 vor, zwischen der Belegung *f*, welcher zu Beginn eine Hülfsladung, z. B. durch Berührung mit einem geriebenen Glasstab oder dergleichen zugeführt wird und dem Saugkamm *g*. Die von bezw. nach *g* abfliessende Influenzelektrizität wird aber von der zwischengeschalteten Vollscheibe *B* aufgefangen bezw. abgegeben und der betrachtete Scheibensektor, welcher hier die Übertragerrolle spielt, wird auf Grund der Saugwirkung denselben Ladungscharakter auf beiden Seiten haben, z. B. negativ, wenn *f* positiv geladen wurde. Das Spiel vollzieht sich nun in ganz ähnlicher Weise wie bei der Töplermaschine, insofern die Weiterdrehung zunächst infolge Kapazitätsverringerung (Entfernung von den leitenden Massen *f* bezw. *g*) eine Spannungssteigerung der Elektrizität des Übertragersektors zur Folge hat. Die Ladung der *A* zugekehrten Innenseite von *B* gleicht sich zunächst mittels des Sauglappens durch die Aussparung *b* mit der Belegung *d* aus. Das hierdurch verstärkte Feld von der negativ gewordenen Belegung *d* stösst hierauf mittels des Saugkammes *i* die gleichnamige Ladung der Aussen- oder Kammseite nach der Funkenstrecke und ladet sie dafür positiv u. s. f.

Der Wechsel der dielektrischen Polarität und die wechselseitige Steigerung erfolgt also ganz ähnlich wie im vorhergehenden Falle, nur brauchen diese Maschinen eine anfängliche künstliche Erregung. Zur Erkennung der Polarität reicht hier meist das Glimmlicht zwischen rotierender Glasscheibe und Saugkamm aus, welches auf Seite des negativen Konduktors als breites blauleuchtendes Strahlenbüschel auftritt, auf Seite des positiven aus einzelnen leuchtenden Punkten besteht.

In beiden Fällen wird die wirklich zur Umsetzung in elektrische Spannungsenergie gelangende Arbeit durch die Bewegung verbraucht, welche den geladenen Übertragerelementen aufgezwungen wird, entgegen der Anziehung durch die elektrischen (ponderomotorischen) Kräfte zwischen Übertragern und Verteilern. Dass die meist erhebliche mechanische Reibung der Maschine vielfach den grösseren Teil der Drehungsarbeit benötigt und den Umsetzungswirkungsgrad sehr herabdrücken wird, kommt hierbei weniger in Betracht, da die technische Verwendung der durch Influenzmaschinen hochgespannten Elektrizität wohl noch nicht ernstlich ins Auge gefasst worden ist.

Namenregister.

N. B. Die Zahlen beziehen sich auf die Artikelnummern (am inneren Seitenkopf) und nicht auf die Seite. Die Nummern 1—43 beziehen sich auf die Entwickelung der Elektrophysik, 44—79 auf die Hülfsvorstellungen.

Sachregister.

N. B. Die Zahlen beziehen sich auf die Artikelnummern (am inneren Seitenkopf) und nicht auf die Seite. Die Nummern 1—43 beziehen sich auf die Entwickelung der Elektrophysik, 44—79 auf die Hülfsvorstellungen.

